

CAPÍTULO 5

Los modelos del *steady state*, *big bang* y multiverso

SECCIÓN 17. FUSIÓN Y PRODUCCIÓN DE ELEMENTOS EN LAS ESTRELLAS

Del descubrimiento de la estructura del átomo, no solamente nació la física cuántica, sino también la física nuclear, igualmente importante en la cosmología dada la fusión de los elementos en el *Big Bang* y en el corazón de las estrellas. En 1900, Friedrich Dorn (1848-1916), un físico alemán, demostró que el radio, descubierto por Marie y Pierre Curie, no solo era radioactivo, sino se transformaba en otro elemento, hasta entonces desconocido, a saber, el radón, un gas inerte. Fue Sir William Ramsay (1852-1916), un químico escocés, quien ya había descubierto otros gases inertes (con valencia cero, es decir, que no se combina con ningún otro elemento para crear moléculas), a saber, helio, neón, argón, criptón, y xenón, exactamente en la columna predicha por Mendeleev, quien determinó el peso atómico del radón. Además, Ramsay y Frederick Soddy (1877-1956), un químico inglés, demostraron, en 1903, que el gas helio era producido en el proceso radioactivo de fisión nuclear de uranio y radio. Por ejemplo, cuando el radio, que cuenta con 88 protones y 138 neutrones decae, se transforma en radón, con 86 protones y 136 neutrones, y helio, que tiene un núcleo de 2 protones y 2 neutrones. En esta lenta transformación del radio en radón y helio (el radio tiene una vida media de 1600 años) se pierde un poco de masa $[226.025402 - (222.01757 + 4.002602) = 0.00523]$ que se libera en la forma de mucha energía, según la famosa ecuación de Einstein, $E = mc^2$.

El primero en integrar la física nuclear con la astrofísica fue Fritz Houtermans,⁸⁹⁴ nacido en 1903, quien publicó en 1929 un artículo en el *Zeitschrift für Physik* sobre el proceso de fusión nuclear en las estrellas. Houtermans cayó en manos, primero de la KGB y después de la GESTAPO, sobreviviendo excepcionalmente ambas experiencias. Durante la detención de Houtermans, Hans Bethe, un físico alemán nacido en 1906 de madre judía, y Premio Nóbel de 1967, quien había escapado de los Nazis en 1933, terminó el trabajo que Houtermans había empezado. Bethe demostró, en 1938, en la Universidad de Cornell de los EUA, cómo se transforma en las estrellas el hidrógeno en helio.

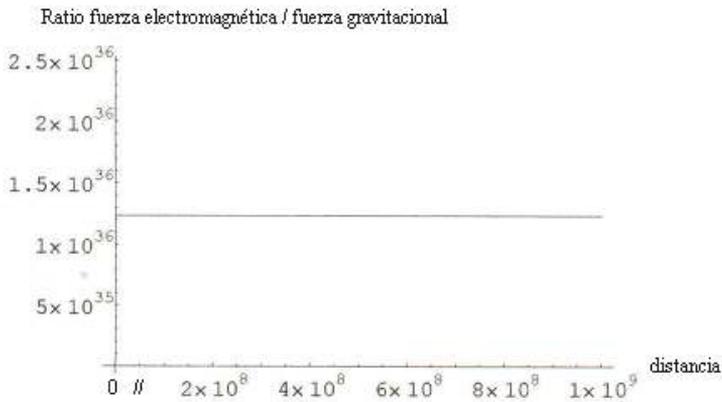
La física nuclear es importante en la cosmología para entender la producción de helio en el *Big Bang*, que ya analizamos (Sección 13.5), y en el corazón de las estrellas la producción de helio a partir de hidrógeno (Sección 17.2), la producción de carbono y oxígeno a partir de helio (Sección 17.3) y de otros elementos más pesados (Sección 17.4). Pero, primero hemos de aclarar cómo en una proto-estrella la fuerza gravitacional, de por sí tan débil, logra vencer la fuerza electromagnética —que es causa de la repulsión entre dos protones—, para que entre en vigor la fuerza nuclear fuerte —que mantiene unidos los mismos protones en los núcleos de los átomos— (Sección 17.1).

Sección 17.1. Cómo la fuerza gravitacional logra superar a la fuerza electromagnética

De por sí, la fuerza electromagnética, que causa de la repulsión entre los protones, es mucho mayor que la fuerza gravitacional, que los hace chocar, como vemos en la siguiente gráfica.

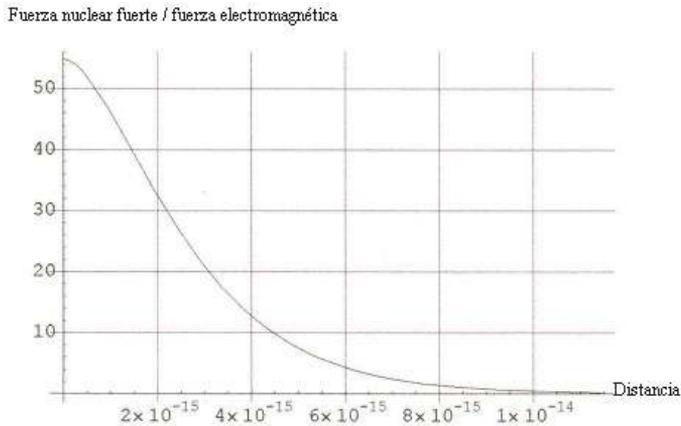
⁸⁹⁴ Simon Singh, *Big Bang. The Origin of the Universe* (2004): 301-303

GRÁFICA. EL RATIO DE LA FUERZA ELECTROMAGNÉTICA Y LA GRAVITACIONAL ES INDEPENDIENTE DE LA DISTANCIA



Sin embargo, la fuerza nuclear, que mantiene unidos a los protones en los núcleos de los átomos, *solamente supera a la fuerza electromagnética a muy corta distancia*, como vemos en la siguiente gráfica.

GRÁFICA. EL RATIO DE LA FUERZA NUCLEAR FUERTE Y LA ELECTROMAGNÉTICA ES UNA FUNCIÓN DE LA DISTANCIA



Se necesita la presión creciente de la fuerza gravitacional para acortar la distancia entre los protones en medida suficiente, para que la fuerza nuclear pueda superar a la electromagnética y mantener unidos a los protones en los núcleos. Normalmente, cuando una nube de gas (p.e. de hidrógeno) se encuentra en equilibrio hidrostático, la energía cinética de las partículas ejerce una presión expansiva que equivale a la energía gravitacional que las hace colapsarse. En nubes más densas, la energía gravitacional produce tanta energía cinética, que los choques entre protones son tan fuertes que la fuerza nuclear fuerte venza a la repulsión electromagnética entre los protones. Existe una masa crítica necesaria para que la fuerza gravitacional logre esta hazaña (véase el Cuadro Matemático 17.1).

CUADRO MATEMÁTICO 17.1 LA MASA CRÍTICA

La masa crítica, donde la energía gravitacional supera la energía cinética de la nube, es la masa de Jeans M_J , que podemos expresar como una función de la presión P , la constante gravitacional G y la densidad de masa ρ ⁸⁹⁵, ó también como una función de la longitud de Jeans l_J y la densidad de masa ρ :⁸⁹⁶

$$(1) M_J = C \frac{P^{3/2}}{G^{3/2} \rho^2} = C \rho l_J^3$$

Si la masa de la nube de gas no rebasa esta frontera crítica, la gravedad no es suficiente para superar la presión térmica e iniciar la producción de helio a partir de la fusión nuclear de hidrógeno y la proto-estrella termina su vida como una enana café, semejante a un planeta. Esto es, por ejemplo, el caso de Júpiter. Pero, si la masa estelar rebasa esta frontera crítica, las cosas cambian radicalmente, como veremos a continuación.

La fuerza gravitacional es proporcional a la masa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. El trabajo que puede realizar la fuerza gravitacional es una función de la masa total de una nube de gas dividida entre el radio de la esfera. En la medida que la gravedad hace su trabajo en la nube de gas, aumenta la densidad de átomos ionizados en esta esfera. Y también, en la medida que la gravedad hace más densa la nube de gas, se disminuye la energía gravitacional. Por la conservación de la energía, en la medida que disminuye la energía gravitacional, aumenta la energía cinética de los átomos. Decir que aumenta la energía cinética de las partículas equivale a decir que aumenta su velocidad, es decir, su temperatura. Ahora bien, cuando esta temperatura y esta densidad rebasan una frontera crítica, se da lo que se llama el 'efecto túnel'. Este efecto se refiere al hecho de que existe una probabilidad pequeña a que dos protones que chocan se junten con dos neutrones, para formar un núcleo de helio. La probabilidad es pequeña, porque normalmente, la fuerza electromagnética repulsiva entre dos protones lo impide. Pero, la gravedad, que alimenta la presión, la densidad y la temperatura de la esfera llega a superar esta repulsión electromagnética a partir de cierta masa crítica.

¿Cómo se las arregla la fuerza gravitacional, de por sí tan débil, para vencer a la fuerza electromagnética? Imaginémonos una serie de nubes de gas, es decir, esferas llenas de átomos de hidrógeno. Cada esfera siguiente tiene diez veces más átomos que la esfera anterior. En la primera esfera solamente se encuentran 10 átomos, en la siguiente 100, el la siguiente 1,000, etcétera. La fuerza electromagnética que impide el encuentro de dos protones, empieza en la primera esfera de 10 átomos con una gran ventaja, *pero no cambia cuando crece la esfera*. En cambio, *el trabajo que puede realizar la fuerza gravitacional se eleva al cuadrado, cada vez que la masa de la esfera se eleva al cubo*. De este hecho se desprende que, cuando la esfera tiene aproximadamente 10^{57} átomos de hidrógeno, el trabajo realizado por la fuerza gravitacional produce choques tan fuertes entre los protones, cuyas cargas positivas se repelen, que la distancia entre ellos se acorta lo suficiente para que la fuerza nuclear fuerte supere la electromagnética, como se explica en el siguiente cuadro matemático.

⁸⁹⁵ Hannu Karttunen, *Fundamental Astronomy* (2003): 123-124

⁸⁹⁶ Sergio Mendoza, *Astrofísica relativista* (2007):113-116, MS www.mendoza.org/sergio. La identidad se da porque

$$l_J = v_{sonido} / \sqrt{G\rho} \quad \& \quad v_{sonido} = \sqrt{P/\rho} \Rightarrow l_J = (P^{1/2} \rho^{-1/2}) / (G^{1/2} \rho^{1/2}) \Rightarrow l_J = (P^{1/2} \rho^{-1}) / G^{1/2} \Rightarrow \rho l_J^3 = (P^{3/2}) / (G^{3/2} \rho).$$

CUADRO MATEMÁTICO 17.2 EL NÚMERO CRÍTICO DE PARTÍCULAS NECESARIO PARA QUE, EN UNA PROTO-ESTRELLA, LA FUERZA GRAVITACIONAL VENZA LA FUERZA ELECTROMAGNÉTICA

La fuerza gravitacional debe vencer la repulsión electromagnética entre los protones. Pero, vimos que *la fuerza electromagnética es $2.262 \cdot 10^{39}$ veces más fuerte que la fuerza gravitacional*. ¿Cómo se la arregla la fuerza gravitacional, de por sí tan débil, para vencer a la fuerza electromagnética? Por observación empírica se sabe que la frontera crítica, cuando se inicia la fusión nuclear, se da cuando la esfera tiene una masa igual o mayor al 80% de la masa del Sol:

$$(2) M_E \geq 0.8M_S,$$

¿Cómo podemos explicarlo teóricamente? La fuerza gravitacional es proporcional a la masa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia:

$$(3) F_G \propto (m/r^2).$$

El trabajo de la fuerza gravitacional es equivalente a la fuerza gravitacional multiplicada por la distancia. En este caso, la distancia es el radio de la esfera (la nube de gas). Por lo tanto, el trabajo del que la fuerza gravitacional es capaz es una función de la masa total de una nube de gas dividida entre el radio de la esfera, a saber:

$$(4) W_G \propto (m/r^2)r = m/r.$$

Ahora bien, en una esfera con densidad constante, la masa es proporcional al volumen (ecuación 5) y, dado que el volumen es proporcional al cubo del radio (ecuación 6), se sigue que el radio es proporcional a la raíz tercera de la masa (ecuación 7):

$$(5) m \propto V \ \&$$

$$(6) V \propto r^3 \Rightarrow r \propto V^{1/3} \Rightarrow$$

$$(7) r \propto m^{1/3}$$

De (4) y (7), se sigue que el trabajo realizado por la gravedad *incrementa* proporcionalmente con la raíz tercera del cuadrado de la masa:

$$(8) W_G \propto \sqrt[3]{m^2} = m^{2/3}.$$

De este hecho se desprende que en el caso de una esfera con 10^n átomos con masa m que se atraen gravitacionalmente, el trabajo que la fuerza gravitacional realiza es:

$$(9) W_G \propto 10^n * 10^{2/3} = 10^{(2/3)n}$$

Por eso decimos que el trabajo realizado por la fuerza gravitacional es una función de la masa de la nube de gas. Llega un momento que la fuerza gravitacional rebasa la fuerza electromagnética. ¿Cómo? Imaginémonos una serie de nubes de gas, es decir, esferas llenas de átomos de hidrógeno. Cada esfera siguiente tiene diez veces más átomos que la esfera anterior. En la primera esfera solamente se encuentran 10 átomos, en la siguiente 100, en la siguiente 1,000, etcétera. La fuerza electro-

magnética que impide el encuentro de dos protones, empieza en la primera esfera de 10 átomos con una ventaja de:

$$(10) E_1/W_1 \propto 2.262 * 10^{39} / 10^{2/3} \cong 10^{38} \Rightarrow$$

$$(11) E_1 \propto 10^{38} W_1,$$

Pero, esta fuerza electromagnética no cambia cuando crece la esfera. En cambio, como ya vimos, el trabajo que puede realizar la fuerza gravitacional se lleva al cuadrado, cada vez que la masa de la esfera se lleva al cubo, es decir,

$$(12) W_n = W_1 * 10^{(2/3)n}.$$

Por lo tanto, cuando

$$(13) E_n = W_n \Rightarrow 10^{(2/3)n} = 10^{38} \Rightarrow (2/3)n = 38 \Rightarrow n = 57.$$

Por lo tanto, cuando la esfera tiene aproximadamente 10^{57} átomos de hidrógeno, el trabajo realizado por la fuerza gravitacional supera la fuerza con que los protones, con carga positiva, se repelen.

Una vez que la gravedad le ‘gana’ al electromagnetismo, habrá suficientes protones que chocan con suficiente velocidad entre ellos para desencadenar los procesos de fusión nuclear. Cuando hay muchos choques de protones de muy alta velocidad, de vez en cuando se fusionan dos para formar un núcleo de helio. Digamos, que si la probabilidad de que dos protones se fusionan es de $p = 10^{-n}$ y si se dan 10^n choques de protones de alta velocidad por segundo por centímetro cúbico, se sigue que cada segundo, en cada centímetro cúbico, se produce un átomo de helio.

Sección 17.2. La producción de helio a partir de hidrógeno en el corazón de las estrellas

La principal fuente de producción de energía en una estrella es la fusión nuclear, sobre todo la fusión de núcleos de hidrógeno (protones) ${}^1H^1$ en helio ${}^4He^2$ (partículas alpha). El ‘número atómico’, al lado derecho, representa el número de protones en un núcleo. El número del lado izquierdo es ‘el peso atómico’ y representa aproximadamente el número total de protones y neutrones del núcleo.

CUADRO MATEMÁTICO 17.3 CALCULANDO LA ENERGÍA QUE SE LIBERA EN LA FUSIÓN NUCLEAR DE HIDRÓGENO AL PRODUCIR HELIO

Para calcular la energía que se libera en la fusión nuclear, hemos de tomar en cuenta lo siguiente:

- 1) $MeV = 10^{-6} J$; $eV = 1.6 * 10^{-13} MeV = 0.16 * 10^{-18} J = 0.16 * 10^{-18} kgm^2s^{-2}$
- 2) unidad de masa atómica: $uma = 1.6605402 * 10^{-27} kg$
- 3) masa del núcleo de carbono: $masa^{12}C^6 = 12uma$
- 4) masa del neutrón: $m_n = 1.674929 * 10^{-24} g$

5) masa del protón: $m_p = 1.6726231 \cdot 10^{-24} \text{ g}$

6) masa del electrón: $m_e = 9.1093897 \cdot 10^{-28} \text{ g}$

7) velocidad de la luz: $c = 299,792,458 \text{ ms}^{-1} \cong 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

8) transformación de masa en energía: $E = mc^2$

La masa del núcleo es menor que la suma de las masas de los nucleones (protones y neutrones). La diferencia se llama la energía de ligadura (*binding energy*). La energía se produce al transformar masa en energía ($E = mc^2$), del helio hasta el hierro por *la fusión* de dos núcleos, y de uranio hasta el hierro por *la fisión* del núcleo.

En el centro de las estrellas, los núcleos de hidrógeno (=protones) fusionan y producen núcleos de helio, perdiendo en el proceso 0.7% de su masa, que se libera en forma de energía. Al transformar un kilogramo de hidrógeno en 0.993 kilogramo de helio, 0.007 kg de hidrógeno se transforma en energía:

$$(14) E = mc^2 = (0.007)(2.99792 \cdot 10^8) \text{ kgm}^2 \text{ s}^{-2} = 2.1 \cdot 10^6 \text{ J}.$$

En el Sol, cada segundo se transforman 584 millones de toneladas de hidrógeno en unos 580 millones de toneladas de helio, transformando unos 4 millones de toneladas de masa en energía. De modo que, cada segundo, el Sol emite energía por un total de:

$$(15) (4 \cdot 10^9)(3 \cdot 10^8) \text{ kgm}^2 \text{ s}^{-2} = 1.2 \cdot 10^{18} \text{ J}.$$

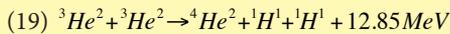
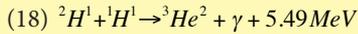
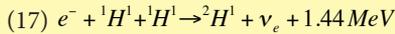
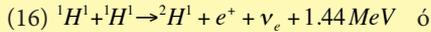
La masa del núcleo es menor que la suma de las masas de los nucleones (protones y neutrones). La diferencia se llama la energía de ligadura (*binding energy*), la cual incrementa en la tabla periódica de los elementos de helio ${}^4\text{He}^2$ hasta hierro ${}^{56}\text{Fe}^{26}$ para luego disminuir del hierro ${}^{56}\text{Fe}^{26}$ hasta uranio ${}^{238}\text{U}^{92}$ y plutonio ${}^{239}\text{Pu}^{94}$. La energía se produce al transformar masa en energía, del helio hasta el hierro, por *la fusión* de dos núcleos, y de uranio hasta el hierro por *la fisión* del núcleo. En circunstancias de muy alta presión y muy alta temperatura, ambas presentes en el centro de las estrellas, los núcleos de hidrógeno (=protones) fusionan y producen núcleos de helio, perdiendo en el proceso 0.7% de su masa, que se libera en forma de energía. Al transformar un kilogramo de hidrógeno en 0.993 kilogramo de helio, 0.007 kg de hidrógeno se transforma en energía.

En el Sol, cada segundo se transforman 584 millones de toneladas de hidrógeno en unos 580 millones de toneladas de helio, transformando unos 4 millones de toneladas de masa en energía. De modo que, cada segundo, el Sol emite mucha energía, por un total de: $1.2 \cdot 10^{18} \text{ Joules}$. Dado que el Sol tiene todavía unas $2 \cdot 10^{27}$ toneladas de ${}^1\text{H}^1$ tiene combustible para unos cuatro a cinco mil millones de años más.

En las estrellas se siguen tres caminos para la transformación de hidrógeno en helio: a saber, la cadena ppI, la cadena ppII y la cadena ppIII. En el Sol, el 91% de la energía producida proviene de la **cadena protón-protón número uno (ppI)**.

CUADRO MATEMÁTICO 17.4 LA CADENA PROTÓN-PROTÓN NÚMERO UNO

La cadena protón-protón número uno sigue tres pasos, formando helio (${}^4\text{He}^2$) a partir de hidrógeno (${}^1\text{H}^1$), mediante deuterio ($= {}^2\text{H}^1 =$ un protón + un neutrón):

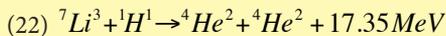
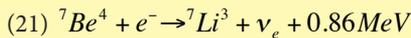
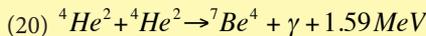


La primera reacción, en donde dos protones se fusionan para formar un núcleo de deuterio, tiene una probabilidad muy baja. Un protón en el centro del Sol tarda en promedio 10^{10} años para colisionar con otro protón y formar deuterio. Si el proceso fuera más rápido, el Sol ya habría acabado todo su combustible hace mucho tiempo. El neutrino ν_e del primer paso escapa del Sol y el positrón e^+ , junto con un electrón e^- se aniquila liberando dos rayos gama. En cambio, la segunda reacción, en donde deuterio y un protón se fusionan para formar un isótopo de helio se da frecuentemente. Por eso, en el centro de las estrellas hay mucho hidrógeno (protones) y poco deuterio.

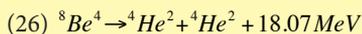
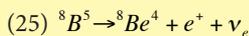
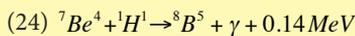
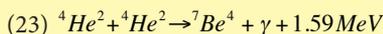
Las cadenas ppII y ppIII comparten con la cadena ppI los primeros pasos, y después van por diferentes caminos. En la cadena ppII se forma helio a partir de hidrógeno. En la cadena ppIII se forma primero un isótopo de boro, a saber, ${}^8\text{B}^5$ y luego un isótopo de berilio, a saber, ${}^8\text{Be}^4$, que acto seguido se desintegra en dos núcleos de helio.

CUADRO MATEMÁTICO 17.5 LAS CADENAS PROTÓN-PROTÓN NÚMERO DOS Y NÚMERO TRES

En la cadena ppII se forma helio a partir de hidrógeno, de la siguiente manera:



En la cadena ppIII se forma primero un isótopo de boro, a saber, ${}^8\text{B}^5$ y luego un isótopo de berilio, a saber, ${}^8\text{Be}^4$, que acto seguido se desintegra en dos núcleos de helio, porque este isótopo tiene una vida media de apenas $7 \cdot 10^{-17}$ segundos:



Sección 17.3. Producción de carbono y oxígeno a partir de helio en las estrellas

Bethe resolvió el problema de la producción de helio a partir de hidrógeno y Fred Hoyle resolvió el enigma de la producción de carbono a partir de helio.

En la **cadena triple alpha**, tres núcleos de helio ${}^4\text{He}^2$ se las arreglan de alguna manera para formar un núcleo de carbono ${}^{12}\text{C}^6$. Históricamente, no se explicaba esta producción de carbono en estrellas muy calientes, porque existen obstáculos aparentemente insuperables. Para entender esto, es necesario familiarizarse con el concepto de **resonancia nuclear**. *Resonancia existe, cuando la suma de la energía intrínseca y la energía cinética de las partículas A y B que se fusionan es igual a o ligeramente menor que la energía del nuevo núcleo fusionado ${}^{12}\text{C}^6$.* La fusión de nuevos núcleos, a partir de otros más ligeros, se facilita mucho si existe resonancia, porque ésta reduce el tiempo necesario para la fusión de manera importante. Si, al contrario, el nuevo núcleo tiene un leve defecto de masa, la masa sobrante de los núcleos que se fusionan, se transforma en energía, según la famosa fórmula de Einstein, pero esta transformación, que libera enormes cantidades de energía, toma relativamente mucho tiempo. Al hacerse más lento el proceso de fusión, existe la posibilidad de que la vida media de uno de los núcleos que se fusionan, sea menor que la duración del proceso de fusión, lo que impediría que la fusión se lleve a cabo. Esto es exactamente lo que pasa en la fusión de berilio y helio, como a continuación se explica.

En el proceso 'triple alpha' deben primero fusionarse dos partículas alpha ${}^4\text{He}^2$ para generar un núcleo de un isótopo de berilio, a saber, ${}^8\text{Be}^4$, que después debe fusionarse con otra partícula alpha para producir carbono ${}^{12}\text{C}^6$, que tiene 6 protones y 6 neutrones. El berilio normal tiene cuatro protones y cinco neutrones, a saber, ${}^9\text{Be}^4$, pero el isótopo ${}^8\text{Be}^4$ tiene solamente cuatro protones y cuatro neutrones, a saber, la suma de dos núcleos de helio. El obstáculo aparentemente insuperable en este proceso triple alpha es que el isótopo de berilio tiene una vida media de $7 \cdot 10^{-17}$ segundos, un tiempo mucho menor que el tiempo necesario para que se fusionen el núcleo de ${}^8\text{Be}^4$ y el núcleo de helio ${}^4\text{He}^2$. Con otras palabras, antes de que el núcleo de carbono ${}^{12}\text{C}^6$ se haya producido, ya se habrá disuelto el núcleo de ${}^8\text{Be}^4$, porque en la fusión de un núcleo de ${}^8\text{Be}^4$ con ${}^4\text{He}^2$ no hay resonancia. Por lo tanto, resulta imposible generar carbono, que es el eslabón intermedio para llegar a todos los demás elementos más pesados que carbono y a la vida en la Tierra que está basada en carbono. Antes de que el carbono se constituya, el isótopo de berilio se desintegra en dos partículas alpha y, por lo tanto: *"¡No habría carbono, ni vida basada en carbono en el Universo!"*⁸⁹⁷

CUADRO MATEMÁTICO 17.6 EL 'CUELLO DE BOTELLA' QUE IMPIDE LLEGAR A LA PRODUCCIÓN DE CARBONO EN LAS ESTRELLAS

Veamos este punto en números. Calculemos primero cuántos mega-electronvolts están contenidos en una uma:

$$(27) \quad {}^{12}\text{C}^6 = \frac{12m_{\text{uma}}c^2}{1\text{eV}(=n\text{MeV})} = \frac{12(1.6605402 \cdot 10^{-27})(299,792.458 \cdot 10^3)^2}{1.60217733 \cdot 10^{-13}} \text{MeV} = 11,177.932 \text{MeV}$$

$$\Rightarrow 1\text{uma} = 931.49433 \text{MeV}$$

⁸⁹⁷ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 253

El ${}^8\text{Be}^4$ tiene una masa atómica de 8.005305 uma y ${}^4\text{He}^2$ de 4.002602 uma⁸⁹⁸

$$(28) \quad {}^8\text{Be}^4 + {}^4\text{He}^4 = 12.007907\text{uma} = 11,185.297\text{MeV}$$

$$(29) \quad {}^{12}\text{C}^6 = 12\text{uma} = 11,177.932\text{MeV}$$

$$(30) \quad \text{sobrante: } 0.007907\text{uma} = +7.365\text{MeV}$$

Por lo tanto, *existe un sobrante de 0.007907 uma = +7.365 MeV que se libera como energía en rayos gama*. Al 'quemarse' la masa atómica sobrante, es decir, al transformarse en energía, antes de que se constituya y se estabilice el núcleo de carbono ${}^{12}\text{C}^6$, ya terminó el tiempo del que dispone el isótopo de berilio ${}^8\text{Be}^4$ con su vida media tan corta de $7 \cdot 10^{-17}$ s.

$$(31) \quad {}^8\text{B}^5 \rightarrow {}^8\text{Be}^4 + e^+ + \nu_e \quad \text{ó}$$

$$(32) \quad {}^4\text{He}^2 + {}^4\text{He}^2 \rightarrow {}^8\text{Be}^4$$

$$(33) \quad {}^8\text{Be}^4 \rightarrow {}^4\text{He}^2 + {}^4\text{He}^2 + 18.07\text{MeV}$$

El astrofísico inglés Fred Hoyle razonó que de la existencia del carbono se deduce que debe existir una manera de producirlo en el corazón de las estrellas y concluyó que *ha de existir un estado excitado de carbono, con 7.6549 MeV más energía que el carbono normal*, como una etapa intermedia que da tiempo para llegar después al carbono normal, no excitado. Si existiera este estado más energético del carbono, al chocar ${}^8\text{Be}^4$ y ${}^4\text{He}^2$, en lugar de un sobrante de +7.365MeV, habría un faltante de -0.29 MeV (que se sustrae de la energía cinética de las partículas vecinas con muy altas temperaturas) y *habría resonancia*: antes de que el isótopo ${}^8\text{Be}^4$ se desintegrara en dos partículas alpha, ya se habría formado el carbono ${}^{12}\text{C}^6$ excitado.

CUADRO MATEMÁTICO 17.7 LA PRODUCCIÓN DE CARBONO EN ESTADO 'EXCITADO' EN EL CORAZÓN DE LAS ESTRELLAS

El éxito o el fracaso de la producción de carbono depende de la energía de su estado excitado:

$$(34) \quad {}^8\text{Be}^4 + {}^4\text{He}^2 = 12.007907\text{uma} = 11,185.297\text{MeV}$$

$$(35) \quad \text{carbono excitado: } {}^{12}\text{C}^6 = 11,185.587\text{MeV}$$

$$(36) \quad \text{faltante: } -0.290\text{MeV}$$

En síntesis:

-fracaso (sin resonancia nuclear):

$$(37) \quad {}^8\text{Be}^4 + {}^4\text{He}^2 \rightarrow 3 \quad {}^4\text{He}^2$$

-éxito (con resonancia nuclear):

$$(38) \quad {}^8\text{Be}^4 + {}^4\text{He}^2 \rightarrow {}^{12}\text{C}^6_{\text{excitado}}$$

⁸⁹⁸ David Lide ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (1994-95): 11-36

Una vez que el carbono se haya ‘tranquilizado’, surge otra amenaza contra la existencia de este elemento. El carbono $^{12}\text{C}^6$ suele fusionarse con helio $^4\text{He}^2$, para producir oxígeno $^{16}\text{O}^8$. Si en esta fusión nuclear hubiera resonancia, es decir, si los núcleos de carbono y helio tuvieran juntos una masa atómica igual a o menor que el núcleo de oxígeno, el carbono no duraría mucho tiempo y sería, acto seguido, transformado en oxígeno y, otra vez, el Universo se quedaría casi sin carbono. Sin embargo, el hecho de que en esta fusión nuclear hay masa atómica sobrante que se transforma en energía, significa que *el proceso se lentifica considerablemente y, por esta razón, una buena parte del carbono sobrevive.*⁸⁹⁹ Otra vez ‘suerte’ para el carbono, en este caso porque *no hay resonancia nuclear.* En conclusión, el carbono tiene ‘suerte’ dos veces: por la *resonancia* en la fusión del isótopo de berilio y helio para formar el carbono *excitado*, por un lado; y por la *falta de resonancia* en la fusión de carbono y helio para formar *oxígeno*, por otro lado. Por esta doble ‘suerte’, hay suficiente carbono en el Universo para que pudiera emerger la vida en la Tierra.

CUADRO MATEMÁTICO 17.8 LA PRODUCCIÓN DE OXÍGENO SE DA GRACIAS A LA FALTA DE RESONANCIA EN LA FUSIÓN NUCLEAR

En la producción de oxígeno no desaparece todo el carbono disponible, gracias a la falta de resonancia en el proceso de fusión nuclear:

$$(39) \quad ^{12}\text{C}^6 + ^4\text{He}^2 \rightarrow ^{16}\text{O}^8 + 7.160\text{MeV}, \text{ por lo siguiente:}$$

$$(40) \quad ^{12}\text{C}^6 + ^4\text{He}^2 = 16.002602\text{uma} = 14,906.333\text{MeV}$$

$$(41) \quad ^{16}\text{O}^8 = 15.994915\text{uma} = 14,899.173\text{MeV}$$

$$(42) \quad \text{sobrante: } 0.007687\text{uma} = +7.160\text{MeV}$$

En 1953, poco después de haber postulado la existencia del Carbono 12 excitado, Hoyle pasaba su año sabático en el *California Institute of Technology*, cerca del *Kellogg Radiation Laboratory*, en donde Willy Fowler se había ganado fama de ser un gran físico nuclear experimental. Hoyle le pidió a Fowler que buscara este Carbono 12 excitado y, después de 10 días, éste encontró, efectivamente, el Carbono 12 excitado con 7.65 MeV más energía que el Carbono 12 normal.⁹⁰⁰

La producción de carbono y oxígeno en las estrellas adquiere particular importancia más adelante, en las Secciones 19 y 25, cuando trataremos el *fine-tuning* de las leyes físicas y sus constantes, haciendo posible la evolución de vida compleja en la Tierra.

Sección 17.4. El ciclo de vida de estrellas de diferentes masas

Subrahmanyam Chandrasekhar (astrónomo nacido en 1910 en la India, quien trabajó en los EUA y Premio Nóbel de 1983) descubrió en 1930 que, una vez acabado todo el combustible nuclear, el destino final de una estrella depende mucho de su masa total. A continuación presento una breve síntesis del ciclo de vida de estrellas de diferentes masas.⁹⁰¹

⁸⁹⁹ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 253

⁹⁰⁰ Simon Singh, *Big Bang. The Origin of the Universe* (2004): 395-396

⁹⁰¹ Hannu Karttunen, *Fundamental Astronomy* (2003): caps. 8 & 11

TABLA. EL CICLO DE VIDA DE LAS ESTRELLAS SEGÚN SU MASA INICIAL

Masa estrella	Ciclo de vida ⁹⁰²
$0.08 M_s \leq M \leq 0.26 M_s$	1 → 2 → 3 → 4
$0.26 M_s \leq M < 1.5 M_s$	1 → 2 → 5 → 6 → 7 → 8 → 9 → 10 → 11 → 12
$M > 1.5 M_s$	1 → 2 → 5 → 13 → 14
$M \cong 5 M_s$	1 → 2 → 5 → 13 → 14 → 15 → 16 → 17 → 18
$M \cong 30 M_s$	1 → 2 → 5 → 13 → 14 → 19 → 20 → 21 → 22

Los diferentes ciclos de vida de las estrellas son una función de su masa, y según el ciclo de vida de cada tipo de estrella se producen los diferentes elementos pesados. Los números de estos diferentes ciclos se explican a continuación.

1) ¿Cómo nace una estrella? Una nube interestelar fría de gas y polvo de hidrógeno, suficientemente voluminoso, con una temperatura de $10^0 K = -263^0 C$ empieza a colapsar, en caída libre, debido a la gravedad. La masa crítica necesaria para este colapso, se llama masa de Jeans, por el astrónomo James Jeans que descubrió esta ley en 1902.⁹⁰³

IMAGEN. NUBES DE GAS INTERESTELAR
Y EL NACIMIENTO DE NUEVAS ESTRELLAS
EN M16 ⁹⁰⁴



Se forman múltiples fragmentos y cada fragmento se transforma en un glóbulo que gira lentamente sobre su eje. El glóbulo se va diferenciando en dos partes, a saber, por un lado, el disco proto-planeta-rio, del cual nacerán planetas, y por otro lado, un núcleo del cual surgirá un sol. Cuando la creciente densidad del núcleo empieza a dificultar el transporte de energía, el gas se calienta y se ioniza, emitiendo ondas de radiación. Para que el hidrógeno empiece a ionizar, se necesita una temperatura de 10 mil grados Kelvin. A una temperatura de unos decenas de miles de grados Kelvin, todo el gas está ionizado, de modo que los átomos de hidrógeno están privados de los electrones.

⁹⁰² Los números de los ciclos se explican en el texto que sigue a continuación

⁹⁰³ Véase el cuadro matemático 17.1

⁹⁰⁴ Imagen del *Hubble Space Telescope*

2) Cuando las dos fuerzas opuestas de la gravedad y la presión generada por la alta temperatura se encuentren en equilibrio hidrostático, se ha formado una proto-estrella. A partir de este momento, la evolución de la estrella depende de la masa de la proto-estrella.

CUADRO MATEMÁTICO 17.9 ECUACIÓN DE EQUILIBRIO HIDROSTÁTICO

La ecuación que describe donde se encuentra este equilibrio hidrostático es la siguiente:⁹⁰⁵

$$(43) \frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r \rho_r}{r^2}$$

3) Si la proto-estrella tiene una masa del ocho por ciento de la masa del Sol o más ($M_E \geq 0.08 M_S$), con una temperatura en el núcleo de $4 \cdot 10^6 K$, muchos protones empiezan a chocar con suficiente velocidad para que se inicien los procesos de fusión nuclear, transformando hidrógeno en helio (${}^1H \rightarrow {}^4He^2$). Cuando en las capas de las esferas, el transporte de calor se da por convección, el hidrógeno caliente sube a la superficie, y el frío baja.

4) Las estrellas pequeñas con una masa M_E de 8% a 26% de la masa del Sol ($0.08 M_S < M_E < .26 M_S$), tardan 30 a 100 mil millones de años en acabar su combustible, para luego colapsar. Dado que el principio de exclusión de Pauli impide que dos electrones se encuentren en el mismo estado cuántico, los electrones ejercen presión contra la fuerza gravitacional. Así nace una enana blanca, que se enfría y se apaga lentamente, pero es estable.

5) Si la estrella tiene una masa de $M_E > 0.26 M_S$, su evolución es diferente. El núcleo donde ocurren los procesos de fusión nuclear crece y simultáneamente la capa exterior de hidrógeno no sujeto a fusión nuclear y más opaca se reduce.

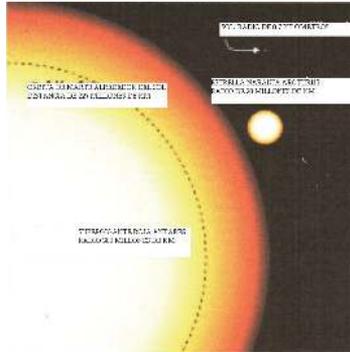
6) Las estrellas de $0.26 M_S < M_E \leq 1.5 M_S$ tardan de 2 a 30 mil millones de años en transformar hidrógeno en helio, por las cadenas ppI, ppII y ppIII que analizamos en la Sección 17.2.

7) El helio se produce primero en el centro, pero, como avanza el tiempo, en una capa más exterior, de modo que existen tres esferas: a) un núcleo de helio inerte; b) una capa intermedia donde el hidrógeno se transforma en helio; y c) una capa exterior de hidrógeno inerte. Dado que los espectros de las estrellas revelan lo que hay en la superficie, se ven pocas líneas espectrales del helio y sobre todo las de hidrógeno.

8) Al final del ciclo de vida de una estrella de $0.26 M_S < M_E \leq 1.5 M_S$, como nuestro Sol, empieza la fase de gigante roja: la estrella se infla, mientras el centro colapsa y se calienta. A una temperatura de $10^8 K$, empieza la producción de carbono por el proceso de triple alpha que analizamos en la Sección 17.3, en forma explosiva y repentina: el llamado *flash* de helio.

⁹⁰⁵ Véase el apéndice VIII, apartado C.3 de este libro

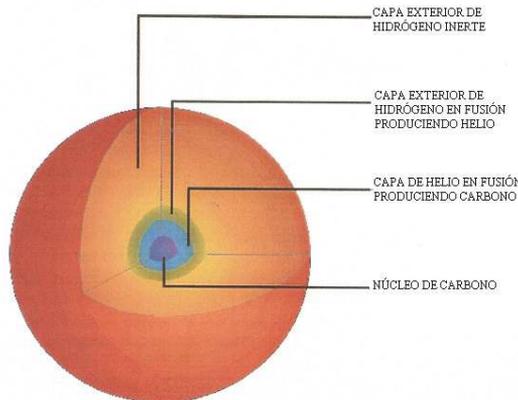
IMAGEN. LA SUPERGIGANTE ROJA ANTARES ⁹⁰⁶



9) Sin embargo, la explosión no destruye la estrella y en el núcleo de la estrella, el helio sigue transformándose en carbono.

10) Conforme avanza el tiempo se genera un núcleo de carbono inerte. En una capa intermedia, sigue dándose la fusión de carbono a partir de helio; en una capa más exterior el hidrógeno sigue transformándose en helio; y la capa más exterior es de hidrógeno inerte y más opaco.

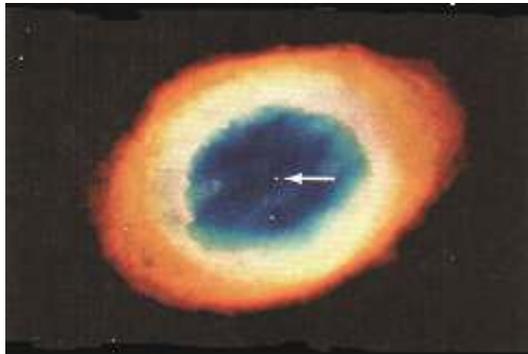
IMAGEN. LAS CAPAS DE UNA ESTRELLA CON DOS PROCESOS DE FUSIÓN NUCLEAR Y TRES ELEMENTOS



11) Las estrellas con una masa menor a tres veces la masa del Sol ($M_E < 3M_S$), nunca llegan a ser suficientemente caliente para empezar el proceso de fusión de helio en carbono antes de la fase de la gigante roja. Por la inflación de la gigante roja, ésta pierde algo de la masa de sus capas exteriores, que son lanzadas al espacio, formando una nebulosa planetaria. Al contraerse la estrella, se calienta y las capas exteriores se hacen visibles por la ionización del gas, una vez que la temperatura rebasa las 10, 000 K. La estrella en el centro se transforma en una enana blanca.

⁹⁰⁶ Imagen tomada Wikipedia, “Antares”, pág. 3

IMAGEN. EL FINAL DE UNA GIGANTE ROJA CON MASA MENOR A $3M_{\odot}$: UNA NEBULOSA PLANETARIA, LA NEBULOSA DE ANILLO, LLAMADA M57, EN LYRA, CON UNA ENANA BLANCA EN EL CENTRO



12) La estrella termina como enana blanca, con carbono en el núcleo, helio en la capa intermedia y una delgada capa de hidrógeno en la superficie. En 1980, Hazard y otros observaron estrellas en el centro de nebulosas planetarias con mayor abundancia de elementos pesados de lo esperado, llamadas también 'estrellas deficientes en hidrógeno', sin saber la explicación. Fue Iben en 1983 quien propuso que se trata de un tardío *flash* de helio, que se lleva a cabo mediante la siguiente secuencia: núcleo inerte sigue en contracción \rightarrow densidad en el núcleo aumenta \rightarrow alta densidad con proceso triple alpha \rightarrow se calienta la estrella hasta 10^8 °C \rightarrow se enciende nuevamente el helio \rightarrow se revuelven las capas. Pero, la teoría de Iben no pudo ser comprobada, porque era necesario presenciar la explosión de una estrella. Haciendo cálculos, los científicos estimaban que este evento se puede observar en el cielo, más o menos cada 50 años, y dura solo unos cuantos días. Había poca confianza en que tal evento, que se produce en un periodo tan corto de tiempo, fuera detectable. Sin embargo en 1996, un astrónomo amateur japonés, Sakurai, detectó este fenómeno, el cual, a partir de este momento ha sido observado y analizado por muchas científicos. El fenómeno del tardío *flash* de helio permite observar de manera excepcional la composición química en el núcleo de la estrella.

13) Cuando la masa de la estrella es de $M_E \geq 1.5M_{\odot}$, se inicia el ciclo CNO (carbono \rightarrow nitrógeno \rightarrow oxígeno). La energía del núcleo de la estrella se transporta hacia la superficie del núcleo por convección, a saber, el proceso de movimientos de gas caliente hacia la superficie y gas frío de la superficie hacia el centro, de modo que ahora el núcleo es convectivo y la estrella es radiativa en la capa exterior.

14) Cuando todo el hidrógeno en el centro se ha quemado, se empieza a quemar el hidrógeno en la capa exterior, alrededor de un núcleo de helio.

15) En estrellas con masa $M_E \geq 1.5M_{\odot}$, el centro de la estrella, constituido por helio, sigue siendo convectivo y se inicia el proceso de triple alpha de producción de carbono. Ahora hay cuatro esferas: en el centro, la transformación de helio en carbono; una capa de helio; una capa donde hidrógeno se transforma en helio; e hidrógeno opaco en la superficie.

16) Posteriormente la producción de carbono a partir de helio se va a una capa más exterior alrededor de un núcleo de carbono ya hecho.

17) En estrellas con masa $3M_S \leq M_E \leq 15M_S$, el carbono en el centro se degenera por la presión gravitacional y se produce un *flash* de carbono.

18) El *flash* de carbono lleva a una supernova y la destrucción parcial de la estrella.

19) En estrellas con masa $M_E \geq 15M_S$, se dan lo mismos procesos mencionados en el punto 15, pero todo el hidrógeno está en proceso de fusión y producción de helio, de modo que no hay una capa exterior de hidrógeno inerte y opaco.

20) En estrellas con masa $M_E \geq 15M_S$, sucede lo mismo que en estrellas con masa menor (ver 15), pero en el centro de la estrella, los núcleos de carbono se fusionan para producir oxígeno, magnesio, silicio, y fierro. Cada vez que se acaba determinado combustible, la estrella quiere colapsar, dando inicio a la fusión de un nuevo elemento más pesado, cuya temperatura detiene la presión de la gravedad, llegando a un nuevo equilibrio hidrostático. Cada proceso de fusión nuclear se da en una capa diferente, por ejemplo, en el centro se produce fierro y en capas más exteriores, silicio, magnesio, oxígeno, carbono, y helio, respectivamente, con hidrógeno en la capa más externa. En ciertos casos se producen también sulfuro y calcio ¡El viejo sueño del alquimista se ha cumplido!, pero a temperaturas no alcanzables en laboratorios terrestres.

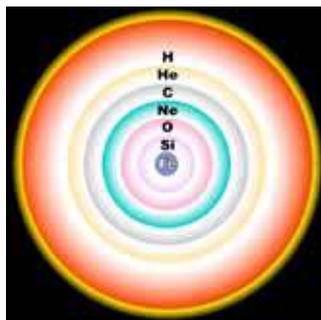


IMAGEN. LA ESTRELLA MASIVA ES UNA FÁBRICA DE ELEMENTOS, DE HELIO HASTA HIERRO, EN FORMA DE CEBOLLA ⁹⁰⁷

21) En la fase final, estas estrellas consisten de aproximadamente seis esferas, a saber: a) un núcleo de fierro; b) silicio; c) oxígeno; d) carbono; e) helio; y f) hidrógeno.

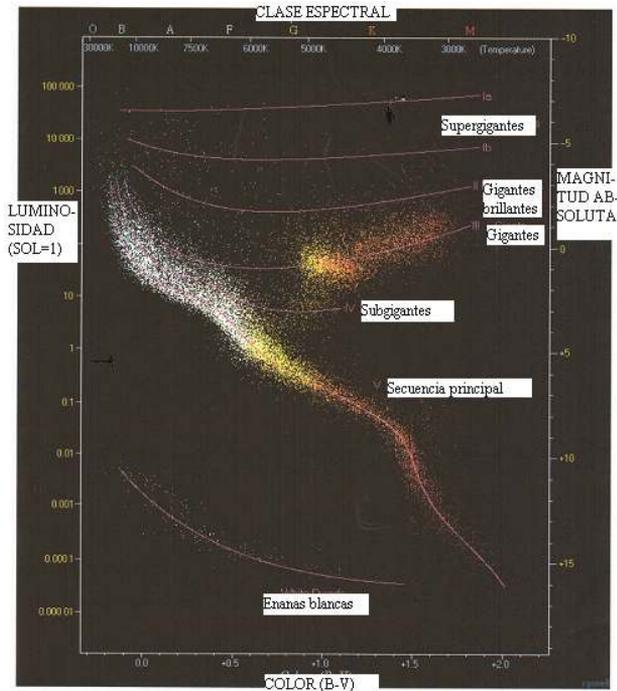
22) Dado que los procesos de fusión nuclear terminan con el fierro, y todo el combustible se ha acabado, la alta temperatura de la fusión nuclear ya no existe y ya no ejerce contrapresión contra la presión gravitacional. Si el núcleo de níquel y fierro en el centro rebasan el límite de Chandrasekhar, la estrella colapsa y deja de sostener las capas más exteriores. El colapso se da con una velocidad del 23% de la luz. El resultado es una supernova. Una supernova puede brillar más que la galaxia a la que

⁹⁰⁷ Wikipedia, *Stellar evolution*, autor/usuario: Rursus. Las capas no son reproducidas a escala. La nucleosíntesis se lleva a cabo en la frontera entre dos capas.

pertenece por varias semanas. En estas supernovas se expulsan los elementos que fueron producidos en las diferentes capas de la nucleosíntesis cuando la estrella estaba en equilibrio hidrostático, por ejemplo, oxígeno, neón y magnesio y silicio y además, elementos producidos en la nucleosíntesis que se lleva a cabo durante la misma explosión, por ejemplo, silicio, azufre, argón y calcio.⁹⁰⁸ En ciertas supernovas de estrellas muy masivas se producen, además, por procesos de fusión nuclear que no liberan sino absorben energía, los elementos de la tabla de Mendeleev que son más pesados que el hierro. La física de este núcleo síntesis de elementos más pesados que el hierro todavía no se comprende muy bien.⁹⁰⁹

23) En el caso de estrellas muy masivas, la presión de la gravedad es tal, que supera la contrapresión de los electrones (ver 4). Al pegarse los electrones con enorme fuerza al protón, el electrón y el protón se transforman en un neutrón, y lo que queda es una estrella de neutrones con un diámetro de unos 30 kilómetros, pero inmensamente pesadas. En el caso de estrellas todavía mucho más masivas, lo que queda es un agujero negro.⁹¹⁰

GRÁFICA. LA EVOLUCIÓN DE LAS ESTRELLAS SEGÚN EL DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG-RUSSELL ⁹¹¹



⁹⁰⁸ Friedrich K. Thielemann, Ken-ichi Nomoto & Michio Hashimoto, "Explosive Nucleosynthesis in Supernovae", en: Nicos Prantzos *et al.*, eds., *Origin and Evolution of the Elements* (1994): 297-309

⁹⁰⁹ M. Arnold & K. Takahashi, "The synthesis of the nuclides heavier than iron: Where do we stand?", en: Nicos Prantzos *et al.*, eds., *Origin and Evolution of the Elements* (1994): 395-411

⁹¹⁰ Véase el Apéndice VI B sobre la relatividad general

⁹¹¹ Imagen tomada de Wikipedia, "Hertzsprung-Russel diagram", pág. 2

El Observatorio de Harvard hizo una primera clasificación de unas 390,000 estrellas dividiéndolas en nueve grupos, cada uno con su propio color, espectro y líneas de absorción, como se puede observar en la clasificación OBAFGKM, la cual vemos reproducida en el diagrama de Hertzsprung-Russell arriba reproducido que grafica algunos ciclos de vida de algunas estrellas.

En el eje vertical de este diagrama, se mide la luminosidad real de la estrella y en el eje horizontal la temperatura efectiva según la clasificación de Harvard. Las estrellas que observamos no están fijas en este diagrama, sino conforme transcurre su ciclo de vida, se mueven en él, es decir, evolucionan —nacen, mueren, renacen y mueren definitivamente—. La siguiente tabla da la duración, en millones de años, de la *contracción* de la nube original, de la estrella en la *secuencia principal*, y de la *gigante roja*, para estrellas de diferentes masas:

TABLA. ETAPAS DE LA VIDA DE UNA ESTRELLA EN MILLONES DE AÑOS

Masa ($n * M_{SOL}$)	Etapa contracción	Etapa secuencia principal	Etapa gigante roja
30	0.02	5	0.75
15	0.06	10	3.7
9	0.2	22	5.2
5	0.6	68	22
3	3	240	89
1.5	20	2,000	280
1 = Sol	50	10,000	680
0.5	200	30,000	N.A.
0.1	500	10,000,000	N.A.

El cuadro en la página siguiente ilustra el proceso de formación de elementos en una estrella con una masa $M_E = 25M_S$, con un ciclo de vida notablemente corto.⁹¹²

SECCIÓN 18. LA EVIDENCIA EMPÍRICA DECIDE ENTRE LOS MODELOS DEL BIG BANG Y DEL STEADY STATE

A continuación veremos los hechos que refutaron el modelo del *Steady State* y corroboraron el modelo del *Big Bang*.

Sección 18.1. El modelo *Steady State* de Hoyle, Gold y Bondi

La expansión del Universo después del *Big Bang* era tan rápida, que apenas hubo tiempo para generar hidrógeno y helio y no había tiempo para la producción de elementos más pesados, en las proporciones en que los encontramos en el Universo actual. Uno de los críticos más feroces del modelo del *Big Bang*, Fred Hoyle, un astrónomo inglés, nacido en 1915, aprovechó esta debilidad del modelo para lanzar su propia teoría, llamada el modelo del *Steady State*.

912 Simon Singh, *Big Bang. The Origin of the Universe* (2004): 388

TABLA. CREACIÓN DE ELEMENTOS EN UNA ESTRELLA CON MASA 25 VECES EL SOL

Fusión nuclear	Temperatura °C	Densidad g / cm^3	Duración	Protones en núcleo	Neutrones en núcleo
hidrógeno \rightarrow helio	$4 \cdot 10^7$	5	10^7 años	2	2
helio \rightarrow carbono	$2 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^2$	10^6 años	6	6
carbono \rightarrow neón + magnesio	$6 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^5$	600 años	10 12	10 12
neón \rightarrow oxígeno + magnesio	$1.2 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^5$	1 año	8 12	8 12
oxígeno \rightarrow azufre + silicio	$1.5 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^7$	$\frac{1}{2}$ año	16 14	16 14
silicio \rightarrow hierro	$2.7 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^7$	1 día	26	30
colapso del centro	$5.4 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{11}$	$\frac{1}{4}$ seg.	N.A.	N.A.
rebote del centro	$23 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^{14}$	0.001 seg.	N.A.	N.A.
supernova \rightarrow elementos pesados	$\pm 1 \cdot 10^9$	varía	10 seg.	>26	>30

Hoyle colaboraba con dos compañeros, Thomas Gold, y Herman Bondi, ambos nacidos en Viena, en 1920 y 1919 respectivamente, que habían escapado a tiempo de la ocupación nazi de Austria. Después de la guerra, en septiembre de 1945, vieron una película en donde un sujeto platica una pesadilla a otros, quienes le platican sus propias pesadillas, y luego despierta y visita otros vecinos a quienes les platica lo que le ha pasado, otra vez intercambian pesadillas y luego, ora vez despierta el protagonista dándose cuenta que era un sueño, etcétera., etcétera La película le daba a Gold la idea que pueden existir situaciones a la vez estables y dinámicas, como un río que fluye. De ahí surgió la idea de un Universo eterno, en expansión continua, en el cual los crecientes huecos entre las galaxias se van llenando con nuevos átomos que se generan espontáneamente en lo que Hoyle bautizó como un 'campo creacional', para luego formar nubes de gas que se van condensando en nuevas estrellas y galaxias, que también se van alejando unas de otras, creando nuevos campos creacionales, generando nuevos átomos, etcétera, etcétera Lo recuerda Fred Hoyle en sus *Reminiscencias* de 1946-47:

“En cierto sentido, se puede decir que el modelo Steady State empezó la noche en que Bondi, Gold y yo vimos una película en Cambridge. La película, si bien me acuerdo, se llama The Dead of Night. Se trataba de una secuencia de cuatro historias de fantasmas narradas por los personajes de la película, aparentemente desconectadas, pero con la característica interesante que el final de la cuarta historia estaba conectado, inesperadamente, con el inicio de la primera, creando así el potencial de un ciclo que nunca termina. Cuando los tres regresamos al cuarto de Bondi en Trinity College, Gold de repente dijo: ‘¿Y qué tal si el Universo es así?’ (...) Se suele pensar que situaciones que no cambian son estáticas. La película de los cuentos de fantasmas nos quitó, nítidamente, esta idea errónea. Se pueden tener situaciones que no cambian, pero que son

dinámicas, como, por ejemplo, un río que corre suavemente. El Universo tendría que ser dinámico, porque el corrimiento al rojo de Hubble demostró que así era.... Desde esta posición, no nos tomó mucho tiempo para entender, que debería de existir una creación continua de materia.”⁹¹³

Hoyle señaló que este Universo sería eterno: “*El presente modelo tiene a la vez un futuro infinito y un pasado infinito.*”⁹¹⁴ Continuamente, algunas galaxias (llamadas *nebulae* por Hoyle) se salían del Universo observable y otras nuevas galaxias se creaban en los vacíos generados por la expansión del Universo, lo que implicaba la conservación no solamente de la masa, sino también de la densidad de masa en el Universo observable.⁹¹⁵ Un problema era que nadie sabía como funcionaba la física de este ‘campo creacional’, pero Hoyle alegaba que no se trataba de la creación de la nada de estrellas y galaxias enteras, sino únicamente de la creación de nuevos átomos, poco a poco, a saber, “*un átomo cada siglo en un volumen igual al Empire State Building.*”⁹¹⁶

Sin decirlo, Hoyle manejaba en el modelo del *Steady State* la idea metafísica de la *generatio ex nihilo* (la generación de algo de la nada), a saber, la generación de nuevos átomos de la nada. Obviamente, del punto de vista de la filosofía de la ciencia, la *generatio ex nihilo* de cualquier cosa, pequeña o grande, poca o mucha, se sale de los parámetros de una teoría *científica*. Por principio, la ciencia busca explicar los fenómenos por medio de relaciones causales, siendo la *generatio ex nihilo* la negación de la causalidad propia de nuestro Universo.⁹¹⁷ La física cuántica permite la producción de partículas y anti-partículas (que son más pequeñas que átomos), en el espacio-tiempo de nuestro Universo, que acto seguido se aniquilan, de modo que solamente queda radiación. Este proceso es diferente de lo postulado por Hoyle, porque no es una *generatio ex nihilo*, dado que el espacio-tiempo está cargado de campos gravitacionales y electromagnéticos.

Los tres compañeros publicaron sus resultados en dos artículos de 1948, el primero, más filosófico, elaborado por Bondi y Gold,⁹¹⁸ y el segundo, más matemático, por Hoyle.⁹¹⁹ Una consecuencia observable y falsificable del modelo de Hoyle era que, en un Universo eterno, las galaxias lejanas y las cercanas tendrían el mismo aspecto, porque las nuevas galaxias surgen, en este modelo, tanto en los campos creacionales muy distantes como en los muy cercanos. Bondi y Gold hicieron explícita esta hipótesis con cuya corroboración o refutación se sostendría o se caería su modelo:

“Nuestro principio cosmológico perfecto implica que ningún rasgo del Universo está sujeto a algún cambio sustantivo, por lo cual no existe una definición única de un tiempo universal. Esto solamente se puede sostener si las edades de las galaxias en un volumen suficientemente grande sigue cierta distribución estadística,

⁹¹³ Citado en Malcolm Longair, *The Cosmic Century* (2006): 324

⁹¹⁴ Fred Hoyle, “A New Model for the Expanding Universe,” en: *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, vol. 108 (1948): 381

⁹¹⁵ Fred Hoyle, “A New Model for the Expanding Universe,” en: *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, vol. 108 (1948): 372-382

⁹¹⁶ Simon Singh, *Big Bang. The Origin of the Universe* (2004): 347

⁹¹⁷ Véase la Sección 25.1

⁹¹⁸ Herman Bondi y Thomas Gold, “The steady state theory of the expanding Universe”, en: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 108 (1948): 252-270

⁹¹⁹ Fred Hoyle, “A New Model for the Expanding Universe”, en: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 108 (1948): 372-382

(....) *La distribución de edades de las galaxias en cualquier volumen debe ser independiente del tiempo de la observación, de modo que será la misma para galaxias lejanas y cercanas, aunque en el primer caso la luz ha tardado más en llegar hasta nosotros.*"⁹²⁰

Al resolver el problema de la producción de elementos más pesados, sobre todo del carbono —que analicé en la Sección 17.3—, Hoyle ayudó tanto al modelo del *Big Bang* como al *Steady State*, porque, hasta este momento, ninguno de los dos modelos había podido resolver el enigma de la producción de elementos más pesados, y sobre todo, de carbono. Sin embargo, todavía no había evidencia empírica decisiva que refutara una teoría o la otra.

Sección 18.2. El descubrimiento de la radiación cósmica de micro-ondas de fondo

Hemos de regresar un poco en la historia, para entender la evidencia empírica la cual, de encontrarse, resultaría ser decisiva para corroborar la teoría del *Big Bang* y refutar el *Steady State*. Recordemos que Alpher y Gamov habían argumentado que la producción de helio en las estrellas no es suficiente para explicar el abundante volumen de helio en el Universo, pero que las reacciones de fusión nuclear en los primeros veinte minutos después del *Big Bang* sí lo explican. Sin embargo, algunos científicos mal pensados no quedaban convencidos, porque sospechaban que Gamov y Alpher habían adaptado sus matemáticas en función de los volúmenes reales del helio en el Universo. Gamov y Alpher echaron mano de las primeras computadoras, que apenas se habían construido, y lograron confirmar, así, sus cálculos sobre la relativa abundancia de hidrógeno y helio. Pero las sospechas no desaparecieron, inspiradas también por el hecho que Alpher era un estudiante sin título y Gamov un escritor popular de cosmología para amateurs a quien le gustaba comportarse como payaso, por ejemplo, cuando él afirmaba que Dios vivía a 9 años luz de la Tierra, porque en 1905, cuando estalló la guerra entre Rusia y Japón, los rusos habían hecho oraciones en sus iglesias y, sin embargo, no fue sino hasta 1923 que Japón fue sacudido por un fuerte terremoto. Siendo ateo, Gamov citó en una publicación los comentarios del Papa Pío XII a favor del modelo del *Big Bang* sin otra intención sino la de provocar un poco a sus colegas. A raíz de estas bromas, Alpher se quejaba que la imagen de payaso de Gamov afectaba negativamente la aceptación de sus publicaciones: *“dado que inyectaba una cantidad considerable de humor en sus presentaciones, frecuentemente no fue tomado en serio por no pocos de sus colegas [y esto] afectó a los otros dos que éramos sus colegas”*.⁹²¹

Alpher, quiso abrirse camino en el mundo académico y, ante la fría recepción de su teoría sobre la abundancia relativa del helio a partir del *Big Bang*, abrió otra línea de investigación. Junto con un compañero, Robert Herman, exploró qué pasó después de los primeros veinte minutos de la evolución del Universo y concluyó que faltaba el calor y la presión críticos necesarios para la fusión nuclear de nuevos elementos, más allá del helio, aunque, por otro lado, todavía hacía suficiente calor (unos millones de grados Kelvin), para que el hidrógeno y helio se comportaran como *plasma*. El plasma es un estado de gas ionizado y caliente, en el cual la alta velocidad de núcleos y electrones im-

⁹²⁰ Herman Bondi & Thomas Gold, “The steady state theory of the expanding Universe”, en: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 108 (1948): 257

⁹²¹ Simon Singh, *Big Bang. The Origin of the Universe* (2004): 335

pide que los electrones se peguen a los núcleos, impidiendo de este modo el libre paso de los fotones y causando así un estado óptico de ‘niebla’.

Calcularon que unos 300,000 años después del *Big Bang*, la temperatura había bajado a unos 3,000 grados Kelvin, permitiendo el fenómeno que se conoce como *recombinación*, a saber, la transición de *plasma* a *gas normal*. En esta transición de fase, los electrones (que tienen una carga negativa) han bajado su velocidad en medida suficiente para quedar atrapados por la carga positiva de los núcleos de gas y empiezan a girar alrededor de éste, a diferentes distancias fijas, así como en todos los átomos normales. Unos 300,000 años después del *Big Bang*, los electrones quedaron atrapados por los núcleos de hidrógeno y helio y, a partir de este momento, los fotones podían viajar libremente en todas las direcciones sin chocar con electrones libres. Se disipó la ‘niebla’ y en el Universo se iluminó con una gran luz que no era otra cosa sino la reliquia de la radiación incandescente de la explosión del mismo *Big Bang*.

Si se considera que el Universo está en continua expansión, la longitud de onda de esta radiación, según Alpher y Herman, se ha venido incrementando, porque el mismo espacio se está estirando por la expansión del espacio. Simultáneamente, la frecuencia de esta radiación se ha venido reduciendo. Calcularon que *todavía hoy* día debería de observarse una tenue radiación, en la frecuencia y longitud de las *microondas electromagnéticas*, con una temperatura de unos 5 grados Kelvin, como una reliquia antiquísima de la luz misma emitida originalmente por el *Big Bang* y estirada por la expansión del espacio durante 13 a 14 mil millones de años. Esta radiación, predicha por Alpher y Herman, se llama hoy día *Cosmic Microwave Background Radiation* (=CMBR). Mediciones más recientes y más exactas dan 2.728 ± 0.004^0 K, con un nivel de confianza de 95%.⁹²² Alpher y Herman publicaron los resultados de esta investigación sobre el CMBR en 1948.⁹²³ Lamentablemente, la comunidad científica seguía ignorándolos. Nadie se puso a buscar en el cosmos esta CMBR. Desilusionados, Gamov, Alpher y Herman publicaron un último artículo, en 1953, resumiendo y afinando sus cálculos, resultados y predicciones,⁹²⁴ y se retiraron de la cosmología para dedicarse a otras áreas de investigación.

Pero, *la verdad o falsedad de las teorías objetivas existen independientemente del proceso subjetivo de aceptación o rechazo por los científicos*. Desde 1948, existían dos teorías objetivas, ambas con predicciones sobre fenómenos observables. No podían ser verdaderas las dos, ó las dos eran falsas, ó una de las dos. Faltaban las evidencias empíricas para corroborar una teoría y refutar la otra, o para refutar las dos, a saber:

PREDICCIONES DE LA TEORÍA DE GAMOV, ALPHER Y HERMAN SOBRE EL *BIG BANG*

Primera predicción: las galaxias se alejan unas de otras, de modo que hay corrimiento al rojo de la luz de las galaxias.

Segunda predicción: la fusión nuclear poco después del *Big Bang* produce una distribución proporcional de hidrógeno y helio de 10 a 1 (número de átomos) o 3 a 1 (peso atómico).

⁹²² Dale J. Fixsen *et al.*, “The cosmic microwave background spectrum from the full COBE FIRAS data set”, en: *Astrophysical Journal*, vol. 473 (1996): 576-587

⁹²³ Ralph Alpher & Robert Herman, “Evolution of the Universe”, en: *Nature*, vol. 162 (1948): 774-775

⁹²⁴ Ralph Alpher, James Follin & Robert Herman, “Physical conditions in the initial stages of the Expanding Universe”, en: *Physical Review*, vol. 92 (1953): 1347-1361

Tercera predicción: en todo el Universo se observa una reliquia de la luz de la explosión original, llamada CMBR, de una longitud de onda de microondas (aproximadamente un milímetro) y una temperatura menor a 15 grados Kelvin.

PREDICCIONES DE LA TEORÍA DE HOYLE, BONDI Y GOLD SOBRE EL *STEADY STATE*

Primera predicción: las galaxias se alejan unas de otras, de modo que hay corrimiento al rojo de la luz de las galaxias.

Segunda predicción: las galaxias muy lejanas (del pasado remoto) y las cercanas tienen todas la misma edad promedio, porque continuamente y en todas partes del Universo se crean nuevas galaxias. Las galaxias jóvenes se encuentran distribuidas homogéneamente en todo el Universo observable, en cada una de sus etapas de evolución.

La primera predicción ya había sido verificada, a favor de *ambas* teorías, de modo que no discriminaba entre ellas. La segunda predicción de la teoría del *Big Bang* también había sido verificada, pero generaba demasiadas dudas y por eso no discriminaba decisivamente entre las dos teorías. Sin embargo, *la tercera predicción de la teoría de Gamov, Alpher y Herman y la segunda predicción de la teoría de Hoyle, Bondi y Gold serían decisivas*. Si una de estas dos predicciones resultara cierta y la otra falsa, una teoría resultaría corroborada y la otra, refutada:

TEORÍA DE GAMOV, ALPHER Y HERMAN: EL UNIVERSO EN EXPANSIÓN DESPUÉS DEL *BIG BANG*

I. Enunciado universal: en todo el Universo se observa una reliquia de la luz de la explosión original, llamada CMBR, de una longitud de onda de microondas (aproximadamente un milímetro) y una temperatura menor a 15 grados Kelvin.

II. Enunciado básico que lo refuta: aquí hay una región espacial-temporal sin CMBR.

Teoría de Hoyle, Bondi y Gold: el Universo en *Steady State* con creación de galaxias

III. Las galaxias muy lejanas (del pasado remoto) y las cercanas tienen todas la misma edad promedio, porque continuamente y en todas partes del Universo se crean nuevas galaxias; las galaxias jóvenes se encuentran distribuidas homogéneamente en todo el Universo.

IV. Enunciado básico que lo refuta: las galaxias lejanas son más jóvenes; las cercanas más viejas.

La historia del descubrimiento del CMBR ha sido narrada por varios autores.⁹²⁵ A continuación la resumo. En 1928, AT&T había empezado un servicio trasatlántico de teléfono por radio y encargaron a Bell Laboratories, en Crawford Hill, New Jersey, detectar las fuentes naturales de ondas de radio, con el fin de neutralizarlas en su servicio telefónico. Karl Janski (1905-1950), un ingeniero electrónico americano que trabajaba en Bell Labs, descubrió dos fuentes de 'ruido': en primer lugar, tormentas cercanas y lejanas; en segundo lugar, una radiación muy débil que sin embargo culminaba cada 23 horas y 56 minutos, es decir, casi cada día. Janski mencionó el fenómeno a Melvin Skellett

⁹²⁵ Entre otros: John Hawley & Katherine Holcomb, *Foundations of Modern Cosmology* (1998): 319-352; Simon Singh, *Big Bang. The Origin of the Universe* (2004): 401-463; George Smoot & Keay Davidson, *Wrinkles in Time* (1993); Steven Weinberg, *Los tres primeros minutos del Universo* (1977): 47-72

quien le explicó que los cuatro minutos faltantes se debían al hecho que un día sideral dura 23 horas y 56 minutos. La Tierra gira cada año $365\frac{1}{4}$ veces sobre su eje, pero simultáneamente da cada año una vuelta alrededor del Sol, razón por la cual la Tierra gira, en realidad, $366\frac{1}{4}$ veces por año sobre su eje con respecto a los astros del firmamento. Dado que un año tiene 8,766 horas, un día sideral (astral) dura $8,766 / 366\frac{1}{4} = 23$ horas y 56 minutos. Janski descubrió que la fuente de estas ondas de radio era el centro de nuestra galaxia y publicó sus resultados en 1933. *De pura casualidad, Bell Labs había descubierto la radio-astronomía.*

Usando equipo de intercepción de señales de radio, abandonado después de la Segunda Guerra Mundial, Sir Martin Ryle, nacido en 1918 y —con Antony Hewish, nacido en 1924, Premio Nobel de 1974; ambos astrofísicos ingleses—, quien había trabajado con radar durante la guerra, mejoró en 1946 la precisión de radio-telescopios, con una técnica que usa varios telescopios dirigidos a una misma fuente de señales de radio. De esta manera logró hacer catálogos cada vez más precisos de fuentes de radio del cosmos, conocidos como 1C, 2C, 3C, 4C (C de Cambridge). Detectó fuentes de radio muy fuertes, pero normalmente invisibles. Al dirigir un telescopio de luz visible a una fuente de radio llamada Cygnus A, Baade comprobó que estas señales no provenían de estrellas sino de galaxias, que hoy se conocen como ‘galaxias de radio.’⁹²⁶

Hasta 1961, Ryle había catalogado 5,000 galaxias de radio y descubrió algo, que fue comprobado, además, por un equipo de radio astrónomos en Sydney, Australia, para el firmamento Sur, a saber, que *las galaxias de radio eran más frecuentes mientras más lejanas*. Este hallazgo claramente contradecía el modelo del *Steady State* que predecía que diferentes tipos de galaxias se encontraban distribuidas en forma homogénea e isotrópica, no solamente en el espacio sino también en el tiempo. Ryle era muy consciente que había corroborado el modelo del *Big Bang*, y refutado el modelo *Steady State*,⁹²⁷ al comprobar que la densidad de fuentes de ondas de radio era mucho mayor a larga distancia que corta, de modo que ciertas galaxias eran más frecuentes en el pasado que en el presente:

*“Este es un resultado muy notable e importante, porque, si aceptamos la conclusión que la mayoría de las estrellas de radio son externas a nuestra Galaxia, —y esta conclusión es difícil de evitar—, entonces no hay manera en que las observaciones pueden ser explicadas en términos de la teoría Steady State.”*⁹²⁸

Hoyle no aceptaba estos resultados que refutaban su modelo, poniendo en duda una y otra vez la técnica de observación y la interpretación de los datos. Es más, en los 1960s, Fred Hoyle y Roger Taylor obtuvieron resultados más precisos sobre la producción de hidrógeno y helio primordial, en el *Big Bang*, en proporciones de 75% y 25%, por masa, confirmando con este resultado el modelo del *Big Bang*, pero no mencionaron este hecho explícitamente.⁹²⁹ Tampoco Bondi y Gold aceptaban el hecho que su teoría había sido refutada por los hechos. Es más, habían anunciado de antemano que estaban tan convencidos de la verdad de su modelo, que lo sostendrían aunque los hechos fueran contrarios

⁹²⁶ Walter Baade & Rudolph Minkowski, “Identification of the radio sources in Cassiopeia, Cygnus A, and Puppis A”, en: *Astrophysical Journal*, vol. 119 (1954): 206-214

⁹²⁷ Martin Ryle, “Radio stars and their cosmological significance,” en: *The Observatory*, vol. 75 (1955): 137-147

⁹²⁸ Citado en Malcolm Longair, *The Cosmic Century* (2006): 326

⁹²⁹ Fred Hoyle & Roger Taylor, “The mystery of the cosmic helium abundance”, en *Nature*, vol. 203 (1964): 1108-1110

a él: “Consideramos que nuestro principio tiene tal importancia fundamental, que estamos dispuestos rechazar implicaciones teóricas de resultados experimentales que contradigan nuestro principio cosmológico perfecto, aún en el caso que estas teorías en cuestión llegarían a ser universalmente aceptadas.”⁹³⁰ ¡Confesión verdaderamente notable! Me limito a comentar que esta postura de Hoyle, Bondi y Gold es diametralmente opuesta a la filosofía de la ciencia de Popper, la cual obliga a abandonar teorías que han sido refutadas por los hechos del mundo físico real.⁹³¹

Otra evidencia obtenida por la radio astronomía, también fue decisiva. En 1963, Maarten Schmidt, un astrónomo holandés-americano, nacido en 1929, descubrió el primer cuasar (*quasi-stellar object*), a saber la fuente de radio número 273 en el tercer catálogo de Ryle (3C 273), con un corrimiento al rojo tan grande que indicaba una velocidad de 16% de la luz (48,000 km/s), a una distancia de más de mil millones de años luz de nuestra galaxia. También los otros quasares, que fueron descubiertos después, se encuentran todos a muy grandes distancias. Dado que los quasares son objetos más jóvenes, se comprobó que el Universo evoluciona en el tiempo. Ahora, muchos cosmólogos, que antes no estaban convencidos, aceptaron el modelo del *Big Bang*, entre ellos, Dennis Sciama, quien dijo: “la evidencia más decisiva descubierta hasta ahora contra el modelo del *Steady State* son las observaciones de los quasares”⁹³²

Si bien la teoría del *Steady State* había sido refutada, faltaba la corroboración de la hipótesis sobre la *CMBR* como última evidencia necesaria para validar definitivamente el modelo del *Big Bang*. Arno Penzias, un físico alemán-americano, nacido en este mismo año de 1933, y Robert Wilson, un astrónomo americano, nacido en 1936, trabajaban en Bell Laboratories donde intentaban determinar las características de ondas de radio que procedían de las capas exteriores de nuestra galaxia. En 1964 descubrieron un ‘ruido’ que no podían explicar. Manteniendo bajo control todas las posibles fuentes de error, incluyendo el excremento de palomas dentro de la antena, cayeron en la cuenta que había una fuente de radiación independiente, de una longitud de onda de un milímetro, que provenía de todas partes en cantidades iguales.

Durante un congreso de astronomía en Montreal, en 1964, Penzias mencionó casualmente esta misteriosa radiación a Robert Burke, un astrónomo del MIT, quien había leído una versión preliminar de una conferencia sobre el trabajo de Robert Dicke y James Peebles, dos astrónomos de Princeton University quienes, sin conocer la teoría de Gamov, Alpher y Herman, habían predicho de nuevo, en forma independiente, la existencia de la *CMBR*, de una longitud de onda de un milímetro. Penzias llamó por teléfono a Dicke, sacándolo de una reunión de trabajo en donde estaban discutiendo la posible construcción de un detector de la *CMBR* e informándole sobre su descubrimiento de la *CMBR* *De pura casualidad, Bell Labs había descubierto la CMBR*. Penzias y Wilson publicaron sus hallazgos empíricos en 1965, en el *Astrophysical Journal* y Dicke y su equipo publicaron, en el mismo número, la explicación teórica del fenómeno.⁹³³ Dicke y Peebles no hicieron referencia

⁹³⁰ Herman Bondi & Thomas Gold, “The steady state theory of the expanding Universe”, en: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 108 (1948): 255

⁹³¹ Véase la Sección 21

⁹³² Citado en Singh, *Big Bang. The Origin of the Universe* (2004): 421

⁹³³ Arno Penzias y Robert Wilson, “A measurement of excess antenna temperature at 4080 MHz”, en: *Astrophysical Journal*, vol. 142 (1965): 419-421 & Robert Dicke, James Peebles *et al.*, “Cosmic black-body radiation”, en: *Astrophysical Journal*, vol. 142 (1965): 414-419

al trabajo previo de Alpher y Herman. En 1978, Penzias y Wilson recibieron el Premio Nóbel por su descubrimiento de la Radiación Cósmica de Fondo.

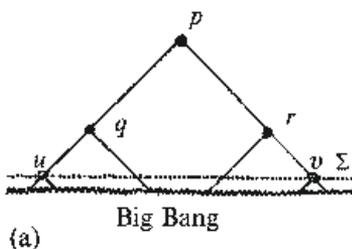
Sección 18.3. El problema de la homogeneidad y del flatness del Universo

El descubrimiento de la radiación cósmica de fondo reveló —con más claridad que la forma relativamente homogénea de las galaxias en regiones opuestas del Universo—, el siguiente misterio: *¿cómo se explica que la densidad del Universo es tan uniforme —homogénea e isotrópica—, aún cuando se trata de regiones del Universo que nunca estuvieron en contacto causal unas con otras?* El problema, en palabras de Kirshner, es el siguiente:

*“Hay algo curioso en la uniformidad de la CMBR [la radiación cósmica de fono]. El horizonte borroso de la CMBR se observa a una distancia de 14 mil millones de años en todas las direcciones. Y la temperatura que observamos es de 2.725 kelvin. Si te volteas y miras a una distancia de 14 mil millones de años, en la dirección opuesta, la temperatura también es de 2.725 kelvin. Ahora bien, fotones solamente pueden viajar con la velocidad de la luz. Las regiones que vemos en lados opuestos del firmamento nunca han podido intercambiar fotones para eliminar las diferencias en radiación. ¿Por qué todas tienen la misma temperatura?”*⁹³⁴

Según la relatividad especial, las causas de cualquier evento deben encontrarse dentro de su *cono de luz*. Ahora bien, puede darse el caso de que dos eventos en las regiones A y B (quasares o la CMBR) del Universo observable están dentro del cono de luz de C —el observador—, pero A no se encuentra en el cono de luz de B, ni B en el cono de luz de A. Este problema se conoce como el **problema del horizonte**. El siguiente dibujo de Penrose explica bien el asunto:

GRÁFICA. EL ‘PROBLEMA DEL HORIZONTE’⁹³⁵



Explicación: q y r están en el cono de luz de p, pero q nunca estuvo en el cono de luz de r, ni r en el cono de luz de q

Para desarrollar el argumento, seguiré los siguientes pasos:

1. Corroboraré primero el enunciado de que existen, efectivamente, regiones del Universo observable que están tan alejadas unas de otras que la luz todavía no ha tenido tiempo de viajar de un lado a otro. Esta corroboración es un simple ejercicio trigonométrico, que permite calcular el ángulo máximo bajo el cual un observador terrestre puede ver dos objetos muy lejanos que han estado en contacto causal uno con el otro. Al constatar que este ángulo es muy pequeño, surge la pregunta de cómo se explica la homogeneidad e isotropía del Universo.

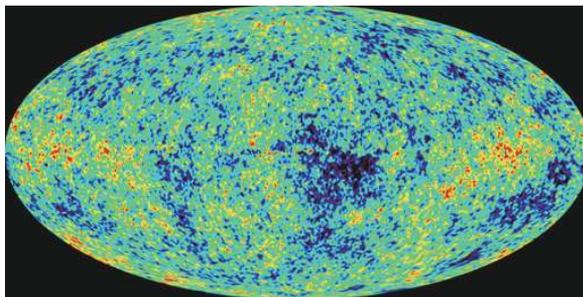
⁹³⁴ Robert Kirshner, *The extravagant universe* (2002): 117

⁹³⁵ Adaptada de: Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 744

2. En seguida, explicaré que las estimaciones actuales de algunos parámetros cosmológicos, en este momento de la historia del Universo, no permiten determinar *con exactitud* este ángulo.
3. Por la variación de la estimación de los parámetros cosmológicos, no es posible decidir sobre esta base, si el espacio tiene una geometría plana, una curvatura cerrada o una curvatura abierta.
4. En la Sección 18.4 analizo una posible solución al problema de la homogeneidad del Universo.
5. En la Sección 20.5 analizo y critico otra posible solución al problema de la homogeneidad, a saber, la teoría de la inflación de Alan Guth.

Hoy día, por mediciones de la anisotropía de la radiación cósmica de fondo,⁹³⁶ se estima que el ángulo máximo bajo el cual se pueden observar objetos a gran distancia “*que pueden haber estado en contacto causal*”⁹³⁷ unos con otros, es $\theta = 1.8^\circ$, lo que corresponde, posiblemente, a una edad actual del Universo de 13.7 mil millones de años; una edad del Universo en el momento de la recombinación de 390,000 años; y $\Omega_M = 0.28$. La siguiente imagen revela esta anisotropía.

IMAGEN. ANISOTROPÍA EN LA RADIACIÓN CÓSMICA DE FONDO, EXCLUYENDO LA VÍA LÁCTEA ⁹³⁸



El consenso entre los cosmólogos modernos es que *el ángulo que se calcula en el siguiente cuadro matemático determina si el espacio es plano (euclidiano), cerrado o abierto*. Algunos llegan a la conclusión que esta curvatura es plana, lo que se conoce como el problema del *flatness* del Universo. *Quiero subrayar, sin embargo, el hecho de que esta ciencia del ángulo no es tan exacta como, a veces, en los libros de difusión y aún en textos científicos, se presume*. El ángulo que corresponde a un Universo plano, es una estimación basada en un conjunto de otras estimaciones de otros parámetros. Tome el lector en cuenta, que estas aproximaciones que analizaremos en el siguiente cuadro matemático suponen las siguientes incertidumbres: a) el factor de escala es *más o menos* inversamente proporcional a la temperatura del Universo; b) las estimaciones de la edad del Universo en el momento de la recombinación varían de 300,000 a 568,000 años; c) la estimación de la edad del Universo, por depender de las estimaciones de H_0 y Ω_M , ambas con un margen de error de $\pm 10\%$, varía de 12.1 a 15.6 mil millones de años.⁹³⁹

⁹³⁶ Véanse, por ejemplo, Wendy Freedman *et al.*, “Measuring and understanding the universe”, en: *Reviews of Modern Physics*, vol. 75 (2003): 1440; y Malcolm Longair, *The Cosmic Century* (2006): 424

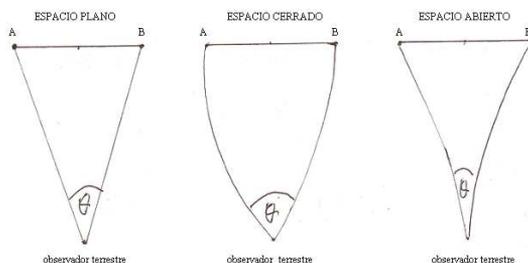
⁹³⁷ Malcolm Longair, *The Cosmic Century* (2006): 417

⁹³⁸ Copyright NASA, <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe>

⁹³⁹ Otras estimaciones son todavía más divergentes, véase Malcolm Longair, *The Cosmic Century* (2006): 346-349

Obviamente, una variación en la estimación de la edad del Universo está correlacionada con una variación en la estimación de la distancia de los objetos observables más lejanos. *Solamente si se hace el supuesto implícito de una distancia fija hasta los objetos más lejanos, en el tiempo de la recombinación, se puede calcular los ángulos de un espacio plano, cerrado o abierto y decidir, con base en $\theta = 1.8^\circ$, que el Universo es plano, como se puede ver en la siguiente gráfica:*

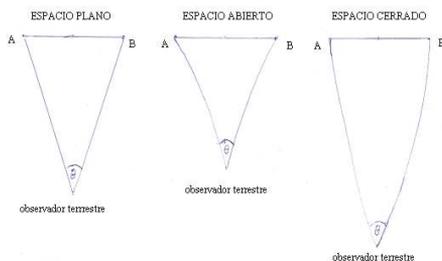
GRÁFICA. LA DISTANCIA IDÉNTICA Y EL ÁNGULO VARIABLE CON QUE SE OBSERVAN OBJETOS QUE HAN ESTADO EN CONTACTO CAUSAL ANTES DE LA RECOMBINACIÓN DECIDEN LA GEOMETRÍA DEL ESPACIO



Explicación: $\theta = 1.8^\circ$ corresponde a una espacio plano; $\theta = 3^\circ$, cerrado; y $\theta = 1.2^\circ$, abierto

Pero, por las incertidumbres en las estimaciones de la distancia y edad del Universo, *el mismo ángulo de $\theta = 1.8^\circ$ puede, en realidad, corresponder a una geometría plana, cerrada o abierta:*

GRÁFICA. EL ÁNGULO IDÉNTICO Y LA DISTANCIA VARIABLE CON QUE SE OBSERVAN OBJETOS QUE HAN ESTADO EN CONTACTO CAUSAL ANTES DE LA RECOMBINACIÓN DECIDEN LA GEOMETRÍA DEL ESPACIO



Explicación: en los tres casos, tenemos el mismo ángulo de $\theta = 1.8^\circ$ que puede, por lo tanto, corresponder a un espacio plano, cerrado, ó abierto, según la distancia hasta los objetos A y B

Por lo tanto, la conclusión es que, *en el momento actual* de la historia del Universo, *nos faltan datos precisos que nos permitan decidir si su geometría realmente sea plana ó abierta.* Esto refuerza lo dicho arriba, a saber, que las geometrías de los tres modelos (cerrado, plano o abierto) solamente empiezan a diferenciarse claramente en etapas más tardías de la evolución del Universo.⁹⁴⁰ El siguiente cuadro matemático explica el efecto de estas incertidumbres acumuladas:

⁹⁴⁰ Véase la Sección 15.3

CUADRO MATEMÁTICO 18.1 EL ÁNGULO MÁXIMO DESDE EL CUAL SE OBSERVAN OBJETOS QUE HAN ESTADO EN CONTACTO CAUSAL

Supongamos que miramos con el *Hubble Space Telescope* muy lejos en el Universo observable, es decir, hacia atrás en el tiempo y observamos dos galaxias a distancia d_1 y d_2 de nosotros y una distancia actual x_a entre ellas. Escogemos las galaxias de tal manera que forman un ángulo θ en el punto de observación y un ángulo de $90^\circ = 0.5\pi$ radianes entre d_1 y x_a . Por Pitágoras,

$$(1) 0.5x_a = d\text{sen}(0.5\theta)$$

Simplificando un poco, al considerar que la distancia d es tan grande que $\text{sen}\theta = x_a/d$, y considerando también que las dos galaxias están a la misma distancia de nosotros, obtenemos:

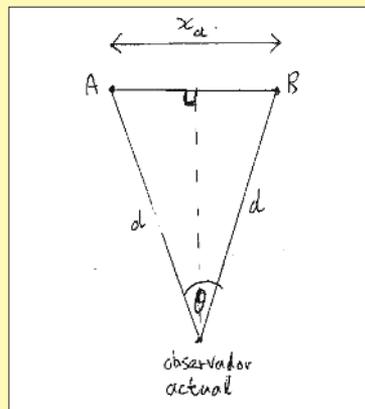
$$(2) x_a \approx d\text{sen}\theta$$

$$(3) d_1 \approx d_2$$

En el momento de la recombinación, unos 300,000 años después del Big Bang, la distancia entre dos objetos que durante 300,000 años se alejaban uno del otro, en dirección opuesta, era

$$(4) x_r = ct_r \approx 3 \cdot 10^8 \cdot 300,000 \cdot 31,563,000 = 2.84067 \cdot 10^{21} \text{ m} \approx 92 \text{ kpc} (= \text{Kilo Pársec})$$

GRÁFICA. EL ÁNGULO MÁXIMO CON QUE SE OBSERVAN OBJETOS QUE HAN ESTADO EN CONTACTO CAUSAL



Explicación: (a) $\text{sen}(0.5\theta) = 0.5x_a/d \Rightarrow 0.5x_a = d\text{sen}(0.5\theta)$; (b) $d = c(t_a - t_r)$;
de (a) y (b) se obtiene (c) $x_a = 2c(t_a - t_e)\text{sen}(0.5\theta)$

Regiones del Universo que en el tiempo de la recombinación estuvieron más alejadas, una de otra, que $x_r = ct_r$, nunca estuvieron en contacto causal, unas con otras, porque los fotones y electrones no tuvieron tiempo para viajar de una región a otra. Esto significa que solamente han estado en contacto causal los objetos lejanos del Universo observable que forman cierto ángulo con nosotros, el observador. Hasta la recombinación, la energía se nivelaba libremente entre diferentes regiones cercanas del Universo, porque los primeros 300,000 años la materia era una plasma ionizada de núcleos de

hidrógeno y helio, en comunicación por medio de fotones y electrones. Después de la recombinación, los electrones quedaban atrapados por los núcleos, formando átomos, y ya no era posible esta nivelación de temperaturas de diferentes regiones. *Lo que se pudo homogeneizar, se homogeneizó antes de la recombinación.* Queremos saber, cuáles regiones del Universo estuvieron suficientemente cercanas unas a otras para esta homogeneización de energía-temperatura.

La distancia d de las galaxias A y B, en el momento de la recombinación, hasta nosotros es igual al tiempo t_a de la edad actual del Universo menos el tiempo t_r (la edad del Universo en el momento de la recombinación), multiplicada con la velocidad de la luz c y simplificando un poco las cosas, por ser $t_a \gg t_r$, obtenemos:

$$(5 A) \quad d = c(t_a - t_r) \cong ct_a \quad \&$$

$$(5 B) \quad t_a \gg t_r \Rightarrow$$

$$(6) \quad d \approx ct_a$$

Dado (1) y (5), se sigue que:

$$(7) \quad 0.5x_a = c(t_a - t_r)\text{sen}(0.5\theta)$$

Simplificando un poco las cosas, con base en (2) y (6), obtenemos:

$$(8) \quad (5B) \quad x_a \approx ct_a \text{sen}\theta$$

Ahora bien, las distancias son una función del factor de escala K de la expansión del Universo, de manera que

$$(9) \quad \frac{x_a}{x_r} = \frac{K(t_a)}{K(t_r)} \Rightarrow x_r = x_a \frac{K(t_r)}{K(t_a)}$$

De (7) y (9), se deriva que:

$$(10) \quad x_r = x_a * \frac{K(t_r)}{K(t_a)} \Rightarrow ct_r = 2c(t_a - t_r)\text{sen}(0.5\theta) * \frac{K(t_r)}{K(t_a)}$$

Simplificando un poco las cosas, con base en (8) y (9) obtenemos:

$$(11) \quad x_r \approx x_a * \frac{K(t_r)}{K(t_a)} \Rightarrow ct_r \approx ct_a \text{sen}\theta * \frac{K(t_r)}{K(t_a)}$$

Ahora bien, el factor de escala K y la temperatura T del Universo en expansión son *más o menos* inversamente proporcionales, de modo que

$$(12) \quad \frac{K(t_r)}{K(t_a)} \approx \frac{T_a}{T_r}$$

Combinando (10) y (12), obtenemos:

$$(13) \quad ct_r = 2c(t_a - t_r)\text{sen}(0.5\theta) \frac{T_a}{T_r} \Rightarrow \text{sen}(0.5\theta) = \frac{t_r}{2(t_a - t_r)} \frac{T_r}{T_a}$$

Simplificando un poco las cosas, con base en (11) y (12), obtenemos:

$$(14) \quad ct_r \approx ct_a \text{sen}\theta \frac{T_a}{T_r} \Rightarrow \text{sen}\theta \approx \frac{t_r}{t_a} \frac{T_r}{T_a}$$

Algebraicamente, las ecuaciones (13) y (14) dan el mismo resultado, hasta dos decimales. Solamente en el tercer decimal surge una mínima diferencia. Pongamos ahora a estas ecuaciones los valores empíricos, del tiempo de la recombinación y del tiempo actual, y de la temperatura en el tiempo de la recombinación y la temperatura actual.

La variación en la estimación de los parámetros. Sobre la edad del Universo había estimaciones muy inexactas, que, sin embargo, han ido reduciendo su margen de error gracias al *Hubble Space Telescope*. Antes la estimación era muy cruda:⁹⁴¹

$$(15) \quad (0.4 \leq h \leq 1) \Rightarrow t_a = \frac{1}{H_0} = 9.7776 * 10^9 \frac{1}{h} \Rightarrow t_a = \frac{1}{H_0} = 9.7776 * 10^9 \frac{1}{h} \text{ años} \Rightarrow \\ 9.7776 * 10^9 \leq t_a \leq 24.444 * 10^9 \text{ años}$$

Hoy día, existen diferentes maneras de calcular la edad del Universo, según la teoría del autor, pero, con un margen de error mucho menor que antes, gracias al *Hubble Space Telescope*. Aún así persiste un margen de error de $\pm 10\%$, así que hoy día, se estima que:

$$(16) \quad H_0 = 70 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \pm 10\% \Rightarrow H_0^{-1} = 4.408 * 10^{17} \text{ s} \pm 10\% \text{ }^{942}.$$

También el estimado valor de Ω_0 ($= \Omega_M$), aunque aparece con aparente exactitud en un estudio de Tegmark y otros⁹⁴³, a saber, $\Omega_0 = 0.28$, tiene un margen de error, según Longair, a saber $0.25 < \Omega_0 < 0.30$.⁹⁴⁴ Para estimar la edad del Universo, se necesitan ambos parámetros, a saber, H_0 y Ω_0 , lo que resulta en una variación de las estimaciones de la edad del Universo. Si ponemos

$$(17) \quad H_0^{-1} = 4.408 * 10^{17} \text{ s} \quad \text{y}$$

$$(18) \quad \Omega_0 = \Omega_M = 0.28,$$

obtenemos, con base en la ecuación de Hamuy:⁹⁴⁵

$$(19) \quad t_a = (H_0^{-1}) \frac{2}{3\sqrt{1-\Omega_m}} \ln \left[\frac{\sqrt{1-\Omega_m} + 1}{\sqrt{\Omega_m}} \right] \approx 13.74 \text{ mil millones de años}$$

⁹⁴¹ Edward Kolb & Michael Turner, *The Early Universe* (1994): 503

⁹⁴² Wendy Freedman *et al.*, "Final results from the Hubble Space Telescope Key Project to measure the Hubble constant", en: *Astrophysical Journal*, vol. 533 (2001): 47-72, reportan $H_0 = 70 \pm 7 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

⁹⁴³ Max Tegmark *et al.*, "Cosmological parameters from SDSS and WMAP", en *Physical Review D*, vol. 69 (2004):1-28

⁹⁴⁴ Malcolm Longair concluye su revisión de los diferentes estudios y estimaciones de Ω_0 así: "El consenso es que la mejor estimación del parámetro de la densidad material general del Universo está dada por $\Omega_0 \approx 0.25 - 0.3$ ", en: *The Cosmic Century* (2006): 361

⁹⁴⁵ Ecuación de Mario Hamuy en www.das.uchile.cl/~mhamuy/courses/AS42A/capitulo5.html

Pero, si tomamos en cuenta el margen de error de ambos parámetros, H_0 y Ω_0 , obtenemos la siguiente variación en la estimación de la edad del Universo:

$$(20) 15.59 > t_a > 12.13 \text{ mil millones de años}$$

La temperatura de la CMBR en la recombinación y hoy, respectivamente, se estima en:

$$(21) T_r \approx 3,000^0 K$$

$$(22) T_a = 2.725^0 K$$

Tenemos estimaciones variadas del momento de la recombinación. El tiempo de la recombinación se estima generalmente en $t_r = 300,000$ años. Pero, en la siguiente estimación de Kolb y Turner,⁹⁴⁶ el tiempo de la recombinación depende de la variación de otras constantes, a saber, de $\Omega_0 = \Omega_M$ y de h :

$$(23) 0.25 < \Omega_M < 0.3$$

$$(24) h \approx 0.7 \pm 10\%$$

Esto nos da la siguiente variación en la estimación del tiempo de la recombinación:

$$(25) t_r = 5.64 * 10^{12} (\Omega_0 h^2)^{-1/2} s \Rightarrow 424,054 < t_r < 567,756 \text{ años,}$$

Tomando en cuenta estas diferentes estimaciones, obtenemos la siguiente variación de la estimación del tiempo de la recombinación:

$$(26) 300,000 < t_r < 568,000 \text{ años,}$$

Tomando en cuenta la variación en las estimaciones de t_r y de t_a (la de t_a depende a su vez de la variación en las estimaciones de H_0^{-1} y Ω_0), obtenemos la siguiente variación en la estimación del ángulo θ bajo el cual observamos objetos lejanos que han estado en relación causal unos con otros, que va de:

$$(27) \text{sen}(0.5\theta) \leq \frac{300,000}{2 * (15.59 * 10^9 - 300,000)} \frac{3 * 10^3}{2.725} \Rightarrow \theta \leq 1.21^0 \text{ hasta:}$$

$$(28) \text{sen}(0.5\theta) \leq \frac{568,000}{2 * (12.13 * 10^9 - 568,000)} \frac{3 * 10^3}{2.725} \Rightarrow \theta \leq 2.95^0$$

La variación de este ángulo, por la variación de las estimaciones de los parámetros necesarios para calcularlo, es, entonces, de $\theta \leq 1.21^0$ a $\theta \leq 2.95^0$. Sustituyendo los datos que hemos usado en las ecuaciones (27) y (28), en la ecuación (7), obtenemos *una distancia máxima entre dos objetos que tuvieron contacto causal antes de la recombinación, de 100 a 190 Mpc* (un Mega pársec = $3.0857 * 10^{22} m$).

⁹⁴⁶ Edward Kolb & Michael Turner, *The Early Universe* (1994): 80

Sin embargo, algunos autores presentan datos sobre las variaciones de la Radiación Cósmica de Fondo que, en la interpretación de ellos, corroboran la hipótesis sobre un Universo plano. Veremos este punto un poco más adelante.⁹⁴⁷

Sección 18.4. La expansión geométrica acelerada del Universo explica su homogeneidad

A continuación analizaré una posible solución al problema de la homogeneidad antes explicada. Steven Weinberg —físico estadounidense nacido en 1933 y Premio Nóbel de 1979—, opina que, un centésimo de segundo después del *Big Bang*, la circunferencia del Universo tal vez haya sido, “unos cuatro años luz”⁹⁴⁸. Él no dice en qué está basada esta estimación. No es que se haya inspirado en la teoría de la inflación de Alan Guth, porque éste publicó su artículo sobre la inflación en la *Physical Review* de 1981, y Weinberg su libro, en 1977. Además, sobre la ‘teoría de la inflación’ no hay ni una palabra en su libro. La estimación de Weinberg implica un radio del Universo de $r \approx \frac{4}{2\pi} = 0.64$ años luz, en el momento $t = 0.01s$. Aunque Weinberg no lo dice, esto implicaría una expansión del Universo, durante el primer centésimo de segundo, mucho mayor que la velocidad de la luz. ¡Con la velocidad de la luz, después de un centésimo de segundo, el radio apenas habría sido 3,000 kilómetros y no $6 \cdot 10^{12}$ kilómetros! Según esta estimación, ¡la expansión del Universo, en este centésimo de segundo fue unos dos mil millones veces más rápida que la velocidad de la luz!

Tal vez la estimación de Weinberg es demasiado alta. Haré una estimación más conservadora, basada nada más en el hecho de que el Universo, en el momento $t = 0.01s$ tuvo que tener el espacio *mínimo* suficiente para albergar unos 10^{80} protones, unos $0.22 \cdot 10^{80}$ neutrones, unos 10^{80} electrones y un sinnúmero de neutrinos —que se estiman existen hoy—. Esta estimación del tamaño *mínimo* del Universo después de un centésimo de segundo, nos da una velocidad de expansión, en el primer centésimo segundo del Universo, *cuando menos* 100,000 veces la velocidad de la luz.⁹⁴⁹

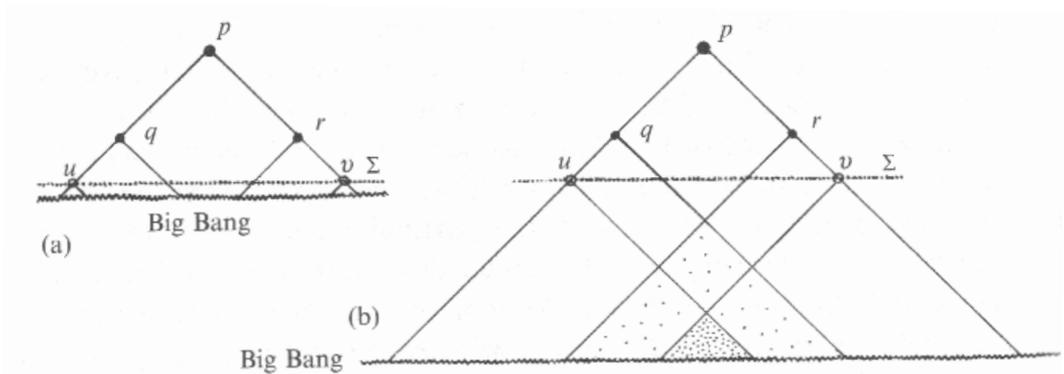
Independientemente si hayan sido cien mil o dos mil millones de veces la velocidad de la luz, *esta expansión acelerada del Universo, explica la homogeneidad del Universo*, particularmente de la radiación cósmica de fondo. El siguiente esquema de Penrose nos explica, que los fotones y electrones, que, después de esta expansión geométrica acelerada, no tuvieron tiempo para viajar de un lado del Universo al otro lado, *antes de esta expansión sí estuvieron en contacto*.

⁹⁴⁷ Véase la Sección 18.5

⁹⁴⁸ Steven Weinberg, *Los tres primeros minutos del Universo* (1977): 94

⁹⁴⁹ Al momento $t = 0.01s$, después de la mutua destrucción de partículas y anti-partículas, se había generado, aproximadamente, un sobrante de 10^{80} protones más $0.22 \cdot 10^{80}$ neutrones, más 10^{80} electrones, más un sinnúmero de neutrinos. Tomando en cuenta solamente los protones y neutrones, en la misma cantidad que los astrofísicos estiman que hoy existen (los neutrones sobre todo en núcleos de helio), *la generación de este sobrante de bariones debe haber causado una súbita expansión geométrica del Universo, en un centésimo segundo* por la siguiente razón. Un protón o neutrón tiene aproximadamente un volumen de $(10^{-15})^3$ metros. Los fotones no compiten por espacio, pero los bariones sí compiten por el espacio disponible. Como el Universo tenía el tamaño de un átomo, aproximadamente, no había espacio disponible cuando parte de la radiación se transformó en materia, de modo que el Universo conoció una rápida expansión geométrica, creando su propio espacio. Estamos hablando de $1.22 \cdot 10^{80} \cdot 10^{-45} = 1.22 \cdot 10^{35}$ metros cúbicos. El volumen de una esfera es $V = (4/3)\pi r^3$, de modo que el radio de la esfera es $r = \sqrt[3]{(3V/4\pi)}$. El radio del Universo, después de esta expansión acelerada, era entonces $r = \sqrt[3]{(3 \cdot 1.22 \cdot 10^{35})/4\pi} = \sqrt[3]{29.125 \cdot 10^{33}} = 0.3076725 \cdot 10^{12}$ metros, o con otras palabras, *¡un poco más de mil segundos luz!* Añadir la masa y el volumen de los electrones no cambia este resultado sustancialmente, porque la masa del electrón es 1/1840 veces la del protón.

GRÁFICA. CÓMO LA EXPANSIÓN GEOMÉTRICA ACELERADA EXPLICA
LA DENSIDAD UNIFORME DEL UNIVERSO ⁹⁵⁰



En el caso de (a), sin expansión acelerada, el observador en (p) ve dos cuasares o la *CMBR* en dirección opuesta, en (q) y (r), que antes estuvieron en (u) y (v), de modo que nunca estuvieron en contacto causal y, sin embargo, son homogéneas. ¿Cómo puede ser esto? Es por la expansión acelerada del Universo entre el momento del *Big Bang*, durante el primer segundo del Universo. El dibujo (b) permite apreciar que ahora (q) y (r) que proceden de (u) y (v) sí estuvieron en contacto, homogeneizando campos gravitacionales, electromagnéticos y temperaturas.

Mi teoría sobre la relación causal entre una expansión geométrica acelerada del Universo, durante el primer centésimo segundo del mismo (la causa), y la casi perfecta uniformidad de densidad de la radiación cósmica de fondo, con una variación máxima de 10^{-5} (el efecto), es una alternativa para la teoría de la inflación de Guth que se analizará más adelante.⁹⁵¹

Sección 18.5. Las pequeñas perturbaciones de la radiación cósmica de fondo

Veamos ahora el punto de las pequeñas perturbaciones en la radiación cósmica de fondo. Hoyle ya había señalado que, según él, una explosión tan violenta como el *Big Bang* habría impedido la formación de galaxias: “*Si postulas una explosión de suficiente violencia para explicar la expansión del Universo, condensaciones que tengan algún parecido con las galaxias jamás habrían podido formarse*”.

⁹⁵² Aunque Hoyle no señaló una contradicción, como él creía, sí reveló un hueco en el modelo del *Big Bang*, a saber, que era indispensable explicar cuál es la causa de los *colapsos gravitacionales regionales* que dieron origen a la evolución de cúmulos de galaxias, galaxias y sistemas solares, que suele describirse mediante la función de masa de Press-Schechter, antes analizada.⁹⁵³ Desde un principio se pensó que las pequeñas fluctuaciones de la radiación cósmica de fondo en el primer segundo de vida del Universo, podría ser la causa de estos colapsos gravitacionales regionales. Era casi imposible observarlas en aquel entonces, porque, en primer lugar, la humedad en la atmósfera de la Tierra emite

⁹⁵⁰ Adaptada de: Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 744

⁹⁵¹ Véase la Sección 20.5

⁹⁵² Simon Singh, *Big Bang. The Origin of the Universe* (2004): 442

⁹⁵³ Véase el cuadro matemático 14.6 de la Sección 14.3

micro-ondas que hacen tanto ruido que no es posible hacer observaciones precisas desde la Tierra; y en segundo lugar, aunque se hubieran hecho observaciones desde el espacio, la tecnología disponible no daba para variaciones de menos de 1 en 100.

George Smoot, Premio Nóbel de 2006, dio 25 años de su vida, con notable tenacidad, a la búsqueda de estas variaciones.⁹⁵⁴ Primero intentó mandar equipo en globos a la estratosfera y no encontró nada. Además, los globos con su equipo, solían perderse. Con la ayuda de la NASA se construyó un satélite, COBE (*Cosmic Background Explorer*) con tres instrumentos, dos para observar radiación de fondo en la longitud del infrarrojo, y uno, el DMR (*Differential Microwave Radiometer*) para observar, con un ángulo de $60^0 = (1/3)\pi(\text{radian})$, la radiación de fondo de las micro-ondas descubiertas por Penzias y Wilson en dos partes del cielo simultáneamente y así determinar la variación entre estas dos partes. Al repetir esta observación millones de veces, se podría hacer un mapa de las variaciones de la temperatura de la CMBR en el cosmos.

El COBE estaba programado para ser lanzado al espacio por un transbordador espacial, en 1988, pero cuando el *Challenger* estalló en llamas, en enero de 1986, todo fue pospuesto. La NASA tenía un viejo cohete espacial, que, sin embargo, no podía transportar las 5 toneladas del COBE, razón por la cual los ingenieros tenían que reducir el tamaño de los tres instrumentos originalmente construidos. Por fin, el COBE fue lanzado exitosamente al espacio, en 1989, para dar 14 vueltas por día alrededor de la Tierra, haciendo un mapa de la radiación de fondo del cosmos. Diferentes *surveys* o mapeos fueron concluidos en 1990 y 1991 y después de muchos meses de trabajo para neutralizar fuentes de ‘ruido’ y error en los datos, por fin, en 1992 se hizo público el anuncio de los resultados, primero en un Congreso del *American Physical Society* y luego en *The Astrophysical Journal*. Se habían detectado variaciones máximas, comparando áreas grandes del cielo, de 1 en 100,000, y otras variaciones menores, en regiones más pequeñas⁹⁵⁵. Este fenómeno se conoce como “invarianza a escala” (*scale invariance*).

En una plática en la Ciudad de México, en junio de 2007, George Smoot conjeturó que de alguna manera las aproximadas cien mil millones de galaxias del Universo observable nacieron de las cien mil millones de perturbaciones cuánticas que se dieron en un objeto del tamaño de un átomo al inicio del *Big Bang*.

CONCLUSIÓN. Hemos visto, hasta ahora, que cuatro enunciados universales de la teoría del *Big Bang* han sido corroborados, así como señala Smoot:⁹⁵⁶

I. El enunciado universal de Alpher & Herman sobre los volúmenes relativos de hidrógeno y helio, coincide bastante bien con los volúmenes de masa observados hoy día, a saber 75.23% y 24.77% respectivamente y es por eso que Peimbert & Luridiana afirman que las cantidades de helio primordial por ellos encontrado coincide “con las predicciones del modelo estándar de la nucleosíntesis del *Big Bang*.”⁹⁵⁷

⁹⁵⁴ George Smoot & Keay Davidson, *Wrinkles in Time* (1993)

⁹⁵⁵ George Smoot & Keay Davidson, *Wrinkles in Time* (1993): 278

⁹⁵⁶ George Smoot & Keay Davidson, *Wrinkles in Time* (1993): 283

⁹⁵⁷ Manuel Peimbert, Valentina Luridiana & Antonio Peimbert, “Revised Primordial Helium Abundance Based on New Atomic Data”, en: *Astrophysical Journal*, vol. 666 (2007): 636-646

II. El enunciado universal de Friedmann-Lemaître sobre *la expansión continua del Universo* y el consecuente ‘estiramiento’ del espacio, fue corroborado por el corrimiento hacia el rojo de la luz de la gran mayoría de las galaxias, descubierto por Hubble.

III. El enunciado universal de Alpher y Herman (y después de Dicke y Peebles) sobre la recombinación de núcleos y electrones, unos 300,000 años después del *Big Bang*, y la consecuente liberación de los fotones de luz con longitudes estiradas progresivamente por la expansión del Universo fue corroborado por el descubrimiento, por Penzias y Wilson, del *Cosmic Microwave Background Radiation (CMBR)*.

IV. El origen de las variaciones de la *CMBR* de 1 en 100,000, bautizadas por Smoot ‘arrugas en el tiempo’ (*wrinkles in time*) explican los colapsos gravitacionales regionales y la formación de las galaxias y grupos de galaxias que hoy observamos en el Universo.

Antes vimos⁹⁵⁸ que Seljak y Zaldarriaga de Harvard generaron curvas de la *CMBR* a partir del modelo Λ CDM, alimentando a la computadora, un total de 16 supuestos sobre parámetros cosmológicos. Con otras palabras, los *supuestos* del modelo influyen poderosamente en el grado de compatibilidad de los datos con el modelo cosmológico de concordancia. Esta dependencia de modelo, aunada a la dispersión de diferentes observaciones, no nos permite refutar un modelo y corroborar otro, sino solamente demuestra que el modelo Λ CDM es *compatible* con los datos. De hecho, vimos antes que existe una interpretación de la *CMBR*, en el contexto del modelo relativista de Buchert-Wiltshire, que prescinde de la energía oscura.⁹⁵⁹

SECCIÓN 19. LEYES Y CONSTANTES FÍSICAS FINAMENTE AJUSTADAS EN EL ORIGEN DEL UNIVERSO

En el transcurso del siglo xx, la comunidad científica ha llegado a una comprensión del *fine-tuning* de nuestro Universo, definido como el conjunto de condiciones iniciales y valores específicos de las constantes de las leyes físicas que ha permitido que emergieran estrellas y vida compleja en la Tierra. Hasta donde yo sé, fue Paul Davies, físico teórico de Inglaterra, el primero en usar el término ‘*fine-tuning*’. Él lo define de la siguiente manera:

“[L]a estructura de muchos de los sistemas familiares observados en la naturaleza son determinados por un número relativamente pequeño de constantes universales. Si estas constantes hubieran tomado valores numéricos diferentes de los observados, la estructura de estos sistemas, en consecuencia, habría sido diferente. Especialmente interesante es que, en muchos casos, solamente una leve alteración de estos valores resultaría en una reestructuración drástica de los sistemas involucrados. Obviamente, la organización particular de nuestro mundo ha sido posible solamente por alguna forma delicada de ‘*fine-tuning*’ de estos valores.”⁹⁶⁰

Probablemente, Roger Penrose exagera cuando afirma que nuestro Universo es un elemento en un conjunto de $(10^{-10})^{123}$ Universos posibles: “*El alfiler del creador debe de encontrar una cajita pequeña, con un tamaño de una parte en $(10^{-10})^{123}$ en el volumen total del conjunto de todos los posibles Univer-*

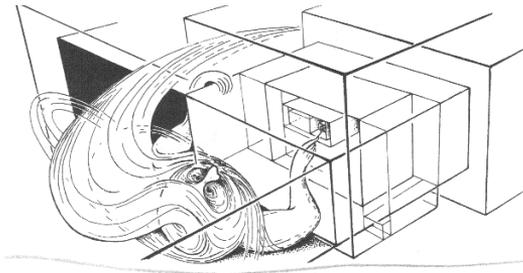
⁹⁵⁸ Véase la Sección 15.4

⁹⁵⁹ Véase la Sección 16.3

⁹⁶⁰ Paul Davies, *The Accidental Universe* (1982): 60

sos, para crear un Universo con un Big Bang tan especial como el en que nos encontramos de hecho,”⁹⁶¹ como vemos en la siguiente imagen.

GRÁFICA. UN UNIVERSO MUY ESPECIAL⁹⁶²



Hay dos maneras de abordar el tema del *fine-tuning*: en primer lugar, el camino que va de una causa a varios efectos, mostrando como el valor preciso de una sola constante es una condición *sine qua non* para la existencia de varias estructuras complejas; en segundo lugar, el camino que va de varias causas a un solo efecto, mostrando como los valores precisos de varias constantes y/o condiciones iniciales son una condición necesaria para que emerja una sola estructura compleja. En los primeros seis apartados de esta sección tomo el segundo camino y en la síntesis al final, el primero:

1. El valor inicial de Ω en el *Big Bang* y la formación de estrellas y galaxias en el Universo
2. La producción y preservación de protones en el *Big Bang*
3. El inicio de fusión nuclear en las estrellas
4. La fusión de helio, carbono, oxígeno y otros elementos pesados en las estrellas
5. La existencia de planetas y de órbitas planetarias casi-circulares y estables
6. La existencia de átomos estables y moléculas complejas
7. Síntesis

Sección 19.1. La constante Ω y la formación de estrellas y galaxias en el Universo

Lo que decide si en el largo plazo emerjan estrellas y galaxias, es un delicado *equilibrio entre los dos extremos de una expansión continua del Universo y un colapso gravitacional*, y depende de la constante Ω , como se puede ver en la siguiente tabla.

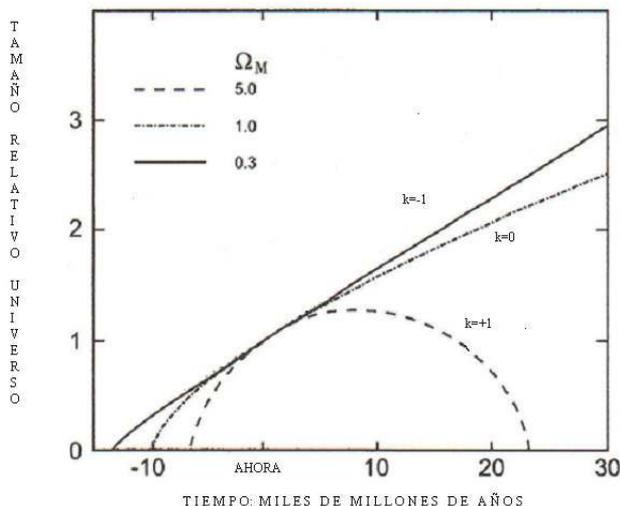
TABLA. MODELO FRIEDMANN-LEMAÎTRE DEL UNIVERSO

Universo	Densidad ρ	Omega $\Omega = \rho/\rho'$	Constante k	Velocidad de expansión $v = H_0 * R$	Destino final del Universo
Cerrado	$\rho > \rho'$	$\Omega > 1$	$k = + 1$	Va bajando y luego es negativa	Colapso
Plano	$\rho = \rho'$	$\Omega = 1$	$k = 0$	Desacelera hasta cero en $t \rightarrow \infty$	Expansión eterna
Abierto	$\rho < \rho'$	$\Omega < 1$	$k = - 1$	Positiva siempre	Expansión eterna

⁹⁶¹ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 730

⁹⁶² Adaptada de: de Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004):730. La imagen del creador no implica un enunciado de fe en una creación divina de parte de Penrose. Se trata de una expresión simbólica del *fine-tuning*.

La constante Ω es la razón de la densidad observada ρ del Universo y la densidad crítica ρ' , es decir, $\Omega = \rho/\rho'$. Si la densidad observada rebasara la densidad crítica, habría un colapso gravitacional; si fuera al revés, habría una expansión acelerada. En el límite, cuando R tiende a infinito y ρ a cero, v_{ex}^2 tiende a $-kc^2$ y, entonces, existen tres escenarios gravitacionales en el espacio-tiempo (véase la siguiente gráfica)

GRÁFICA. EL MODELO FRIEDMANN-LEMAÎTRE ⁹⁶³

La posibilidad de vida compleja en el Universo depende de una condición inicial muy importante, a saber, el valor de Ω . Para que el Universo no colapse sobre sí mismo ni se expanda demasiado rápidamente, al principio, Ω debe haber sido ser equivalente a uno o un poco menos que la unidad. Una expansión demasiado rápida habría impedido el colapso de nubes de hidrógeno y helio, y, en consecuencia, la formación de galaxias y estrellas, y, por otro lado, una expansión demasiado lenta habría resultado en un colapso prematura del Universo recién nacido, antes de que estrellas y galaxias pudieran formarse.⁹⁶⁴ Esto no significa que Ω sea exactamente uno HOY. Pero, aunque hoy $\Omega = 0.3$, esto no quita el *fine-tuning* en el Big Bang: “Tal vez [hoy] Ω no sea exactamente uno, pero hoy es al menos $\Omega_M = 0.3$. A primera vista, esto no parece indicar *fine-tuning*. Sin embargo, este valor implica que Ω tenía un valor muy cercano a la unidad en los principios del Universo”, algo así como $\Omega = 1 - [1/10^{15}]$ (nota ⁹⁶⁵), como podemos verificar en el siguiente cuadro matemático:

⁹⁶³ Adaptación basada en: Guillermo Gonzalez & Jay Richards, *The Privileged Planet* (2004): 185, quité la constante cosmológica, por carecer de evidencia científica que corrobore su existencia: véase las Secciones 15 y 16

⁹⁶⁴ Guillermo Gonzalez & Jay Richards, *The Privileged Planet* (2004): 197

⁹⁶⁵ Martin Rees, *Just Six Numbers* (2000): 97-99

CUADRO MATEMÁTICO 19.1 LA DENSIDAD CRÍTICA DEL UNIVERSO

Reproduzco de la Sección 13.2 y 13.4 algunas definiciones. La constante de Hubble establece una relación constante entre la velocidad de recesión de una galaxia (que es equivalente a la velocidad de expansión del Universo v_{ex} en este punto del Universo) y su distancia d de la Tierra:

$$(1) H = v_{ex}/d \Rightarrow v_{ex} = Hd$$

Supongamos que estamos en el límite del Universo observable viendo una galaxia con una alta velocidad de recesión. Por lo tanto, en este caso la distancia d es equivalente al radio R del Universo. Por lo tanto, la ecuación (1) se transforma en:

$$(2) v_{ex} = HR \Rightarrow v_{ex}^2 = H^2 R^2 = \frac{8}{3} \pi GR^2 \rho - kc^2$$

De la ecuación (2) se deduce que la densidad del Universo ρ es:

$$(3) \rho = 3H^2/8\pi G + 3kc^2/8\pi GR^2$$

La densidad crítica ρ' se obtiene, cuando $k = 0$:

$$(4) \rho' = 3H^2/8\pi G$$

Así, obtenemos Ω como una función de la constante de Friedmann-Lemaître k , la velocidad de la luz c y la velocidad de expansión v_{ex} . La ecuación (5) es la (366) del Apéndice VI B sobre la relatividad general:

$$(5) \Omega = \frac{\rho}{\rho'} = 1 + \frac{kc^2}{R^2 H^2} = 1 + \frac{kc^2}{v_{ex}^2}$$

El lector tal vez no capte de inmediato cómo se puede llegar de un valor de $\Omega \approx 0.3$, hoy, a partir de $\Omega \approx 1$, en el *Big Bang*. Veamos un ejemplo numérico. Demos a la densidad crítica el valor de $\rho' = 1$ y supongamos que el *Big Bang* empieza con un valor empírico de:

$$(6) \rho = (1 - 1/10^{15}).$$

Por lo tanto, en el *Big Bang*,

$$(7) \Omega_{t=0} = \rho/\rho' = [(1 - 1/10^{15})/1] \approx 1.$$

La densidad al principio es muy alta, pero, con el paso del tiempo va disminuyendo por la expansión del Universo. Supongamos que cada unidad de tiempo, la densidad se reduce, multiplicándola con un factor equivalente a la densidad original, de modo que después de n unidades de tiempo:

$$(8) \Omega_{t=n} = \rho/\rho' = [(1 - 1/10^{15})^n / 1^n].$$

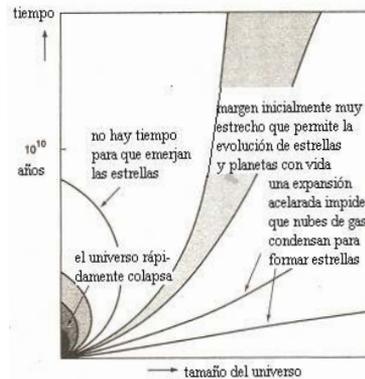
Para que omega se reduzca a

$$(9) \Omega_0 = (1 - 1/10^{15})^n = 0.3,$$

pasa mucho tiempo.

La siguiente gráfica permite apreciar la extrema dependencia de la posibilidad de la evolución de estructuras y vida complejas del valor inicial de omega:

GRÁFICA. EL DELICADO EQUILIBRIO ENTRE LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO Y UN COLAPSO GRAVITACIONAL ⁹⁶⁶



La conclusión es que Ω tuvo al inicio del Universo un valor muy finamente ajustado para que después pudieran darse la formación de estrellas y galaxias: “*Resulta sorprendente que nuestro Universo se inició con un ímpetu muy finamente ajustado, casi exactamente suficiente para contrarrestar la tendencia de desaceleración producida por la gravedad. (...) La precisión requerida es asombrosa: un segundo después del Big bang, el valor de la constante Ω no puede haber diferido de $\Omega = 1$ más que una parte en mil millones de millones, para lograr que nuestro Universo hoy, después de más de diez mil millones de años, todavía pueda seguir expandiéndose con una valor de Ω no muy diferente de la unidad*”.⁹⁶⁷

Sección 19.2. La producción y preservación de protones en el Big Bang

Los ladrillos básicos observables de la materia son los protones, que tienen una carga positiva, lo que permite que el núcleo de un átomo tenga una carga positiva, lo que a su vez permite que un número igual de electrones con carga negativa gire alrededor de este núcleo, lo que significa que el átomo tiene una carga neta cero. Sucede que en el Universo, los neutrones, con carga cero, son los nucleones inestables y los protones, con carga +1, los estables. Si no fuera por un tipo de *fine-tuning* los protones habrían sido los inestables y no tendríamos átomos estables, como veremos a continuación.

Antes vimos⁹⁶⁸ que, de los 10^{-10} a un segundo de la evolución del Universo, la materia se organizó como *protones y neutrones*. Vimos que fotones muy energéticos pueden producir protones y anti-protones y neutrones y anti-neutrones, que luego se aniquilan generando rayos gama.⁹⁶⁹ Sin embargo, existe un consenso entre cosmólogos que después de la mutua destrucción de materia y anti-materia, quedó un sobrante de materia, es decir, de protones y neutrones. Por la fuerza nuclear débil,

⁹⁶⁶ Adaptada de: Martin Rees, *Just Six Numbers* (2000): 98

⁹⁶⁷ Martin Rees, *Just Six Numbers* (2000): 99

⁹⁶⁸ En la Sección 13.4

⁹⁶⁹ Jonathan Allday, *Quarks, Leptons and the Big Bang* (2002): 244-266

los neutrones, que apenas tienen una vida media de poco más de 10 minutos, decaen en protones y electrones, o también es posible que neutrones y positrones se combinen produciendo protones.⁹⁷⁰

Mientras la temperatura fue suficientemente alta, la tasa de transformación de neutrones en protones y vice-versa, era posible, no obstante la rápida expansión del Universo, y existía un equilibrio termodinámico. Pero cuando la temperatura cae, el equilibrio se rompe y la relativa abundancia de ambas partículas se fija en el valor que tenía a la temperatura que reinaba cuando se rompió el equilibrio.⁹⁷¹ Abajo de esta temperatura, solamente decaen los neutrones para generar protones, y no vice-versa y en el *Big Bang* los neutrones se habrían acabado si no se hubiera iniciado el proceso de fusión nuclear, por el cual cierta cantidad de neutrones quedó conservada en núcleos de helio.

CUADRO MATEMÁTICO 19.2 DOS CASOS DE FINE-TUNING: LA RAZÓN DE LA FUERZA DÉBIL Y FUERZA GRAVITACIONAL Y LA DIFERENCIA DE LAS MASAS DEL PROTÓN Y NEUTRÓN

La temperatura crítica T_F es la siguiente:

$$(10) kT_F \approx G^{1/6} g_w^{-2/3} \hbar^{11/6} c^{-7/6} \text{ (nota 972)}$$

Ahora bien, aquí intervienen dos coincidencias. En primer lugar, la coincidencia Carr-Rees, a saber, “una relación fundamental entre la fuerza nuclear débil y la fuerza gravitacional”:⁹⁷³

$$(11) \left(\frac{Gm_e^2}{\hbar c} \right)^{1/4} \approx \left(\frac{g_w m_e^2 c}{\hbar^3} \right) \equiv \alpha_w \approx 6.47 * 10^{-12}$$

$$(12) g_w = \left(\frac{Gm_e^2}{\hbar c} \right)^{1/4} * \left(\frac{\hbar^3}{m_e^2 c} \right) \equiv G^{1/4} m_e^{-3/2} \hbar^{11/4} c^{-5/4} \Rightarrow$$

Si sustituimos el valor de g_w de la ecuación (12) en la ecuación (10), obtenemos:

$$(13) kT_F \approx m_e c^2$$

La segunda coincidencia es el hecho que la diferencia de masa entre neutrón y protón Δm es un poco mayor que la masa del electrón m_e :⁹⁷⁴

$$(14) \Delta m - m_e = 1.396 \text{ MeV} - 0.511 \text{ MeV} = 0.883 \text{ MeV} \Rightarrow \Delta m - m_e \geq 0 \Rightarrow$$

$$(15) \Delta m \geq m_e$$

Si sustituimos (15) en la (13), obtenemos:

$$(16) kT_F \approx (\Delta m)c^2 \Rightarrow \frac{(\Delta m)c^2}{kT_F} \approx 1$$

⁹⁷⁰ Véase el cuadro matemático 13.7 de la Sección 13.5

⁹⁷¹ Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 62

⁹⁷² Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 63

⁹⁷³ B. Carr & Martin Rees, *Nature*, vol. 278 (1979): 611 y Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 63. John Barrow & Frank Tipler, en *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 399, fieles a su anotación estandarizada, fijan $\hbar = 1$ y $c = 1$ y obtienen $G_p m_e^2 \approx (Gm_e^2)^{1/4}$, lo que puede engañar al lector incauto y confiado.

⁹⁷⁴ Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 63, reproducida en John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 400

Por otro lado, conocemos el factor de Boltzmann, que determina la relativa abundancia de partículas de diferentes especies:⁹⁷⁵

$$(17) \frac{N_{p2}}{N_{p1}} = e^{-(m_2 - m_1)c^2 / kT}$$

Sustituyendo (16) en la (17), obtenemos la siguiente aproximación:

$$(18) \frac{N_{\text{neutrones}}}{N_{\text{protones}}} \approx e^{-1} \approx 0.37$$

Las dos coincidencias que intervienen en el nivel de la temperatura crítica que fija la relativa abundancia de protones y neutrones, a saber, en primer lugar, una relación especial entre la fuerza nuclear débil y la fuerza gravitacional, y en segundo lugar, el hecho de que la diferencia de masa entre neutrón y protón Δm es un poco mayor que la masa del electrón m_e , nos da una relativa abundancia de neutrones y protones de 27% y 73%, aproximadamente. Empíricamente, las relativas abundancias son ligeramente diferentes, es decir, 13% y 87%, respectivamente. Pero, lo importante aquí no son los valores exactos, sino *el hecho de que las dos coincidencias mencionadas fueron la causa de que quedaran mucho más protones que neutrones*. Si la razón de las abundancias de neutrones y protones hubiera sido, p.e., $e^{-0.1} \approx 0.9$ (nota ⁹⁷⁶), el número de neutrones y protones habría sido casi igual, con consecuencias desastrosas, como veremos a continuación.

Después de la formación de neutrones y protones sigue, en la historia incipiente del Universo,⁹⁷⁷ *el proceso de fusión nuclear*. De los tres hasta los 20 minutos, aproximadamente, cuando el Universo se transformó en una gigantesca bomba de hidrógeno, con un radio de casi un año luz, se formaron núcleos de helio y un poco de deuterio y litio. Con su sensibilidad notable para detectar el *fine-tuning* del Universo donde se encuentra, Fred Hoyle señaló que la generación de helio e hidrógeno en proporciones relativamente abundantes depende mucho de la densidad finamente ajustada de materia-radiación que empíricamente se dio en el *Big Bang*:

*“Si la densidad es demasiado baja, los protones producidos no se combinan con los neutrones que quedan y se produce muy poco helio. Por otro lado, si la densidad es demasiado alta, se da una completa combinación de neutrones y protones, y con la combinación adicional del deuterio en helio queda con el paso del tiempo muy poco hidrógeno.”*⁹⁷⁸

La temperatura había bajado lo suficiente y la materia-energía fue suficientemente densa para que los núcleos de deuterio pudieran mantenerse unidos, y las reacciones nucleares que ya habían empezado un poco antes, generando núcleos inestables, *ahora producían núcleos estables de helio* (y algunos isótopos de éste y otros elementos ligeros como litio), con un balance de 13% de neutrones y 87% de

⁹⁷⁵ Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 33

⁹⁷⁶ Si $kT_F > \Delta mc^2$, por ejemplo, $(\Delta mc^2 / kT_F) \approx 0.1$

⁹⁷⁷ Véase la Sección 13.4

⁹⁷⁸ Fred Hoyle & Roger Tayler, “The mystery of the cosmic helium abundance,” en: *Nature*, vol. 203 (1964): 1108

protones.⁹⁷⁹ Antonio Peimbert de la UNAM y sus colaboradores calcularon *la abundancia exacta del helio primordial en el Universo, a saber 24.77%* (nota⁹⁸⁰) lo que deja una proporción de hidrógeno de 75.23%. El resultado principal de estas fusiones es la existencia de ${}^4\text{He}^2$ (dos protones + dos neutrones). “Una vez atados en núcleos estables, la interacción fuerte entre protones y neutrones estabiliza los neutrones, previniendo su decaimiento posterior.”⁹⁸¹

Ahora bien, “si el factor Boltzmann hubiera sido cercano a la unidad, habría quedado muy poco hidrógeno en el Universo”⁹⁸² y nos habríamos quedado con un Universo con nubes de puro helio, lo que habría impedido la formación de sistemas solares con planetas. Es que los procesos de fusión de hidrógeno en helio son relativamente lentos, pero los de la transformación de helio en carbono y oxígeno relativamente rápidos. Estrellas de helio acabarían su combustible unas cien veces más rápidamente que estrellas con masa comparable de hidrógeno, y no darían tiempo para la evolución de la vida: “Una estrella de helio de masa apropiada no duraría ni remotamente el tiempo suficiente para que la vida pudiera emerger”.⁹⁸³ Además (casi) no existiría hidrógeno para producir material orgánico y agua, indispensables para la vida.⁹⁸⁴

En el caso de que la diferencia entre masa del protón y masa del neutrón fuera menor que la masa de electrón, el resultado sería un Universo de puros neutrones, como se explica a continuación. La diferencia de masa entre un neutrón y un protón, es la milésima parte de la masa del protón. Ahora bien, si esta diferencia de masa hubiera sido “solamente una tercera parte de este valor empírico, los neutrones libres no podrían decaer en protones, porque no tendrían masa suficiente para producir el electrón requerido.”⁹⁸⁵ No sería posible, entonces, el decaimiento de un neutrón en un protón y un electrón. En lugar de este decaimiento, se daría el decaimiento al revés, a saber, del protón más el electrón en un neutrón.⁹⁸⁶ Si la masa del neutrón fuera aún menos, por ejemplo, el 98.8% de su valor empírico, el neutrón tendría menos masa que el protón, de modo que el decaimiento de un neutrón en un protón y un electrón sería igualmente imposible. El nucleón inestable sería el protón y el protón decaería en un neutrón y un positrón. En ambos casos, *las estructuras del Universo, decaerían en estructuras de neutrones por la aniquilación de protones y electrones.*⁹⁸⁷ No existirían, por lo tanto, ni protones, ni electrones. En una palabra, ¡no habría átomos!, como afirman Davies⁹⁸⁸ y Barrow y Tipler⁹⁸⁹. Los detalles se encuentran en el siguiente cuadro matemático.

⁹⁷⁹ Steven Weinberg, *Los primeros tres minutos del Universo* (1977): 98

⁹⁸⁰ Manuel Peimbert y Valentina Luridiana & Antonio Peimbert, *Astrophysical Journal*, vol. 666 (2007): 636-646

⁹⁸¹ Jonathan Allday, *Quarks, Leptons and the Big Bang* (2002): 263

⁹⁸² Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 64

⁹⁸³ Guillermo Gonzalez & Jay Richards, *The Privileged Planet* (2004): 202-203; John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 398-400

⁹⁸⁴ Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 65; John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 399

⁹⁸⁵ Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 65

⁹⁸⁶ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 400

⁹⁸⁷ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 400

⁹⁸⁸ Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 65

⁹⁸⁹ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 400. Además, no habría estrellas normales, porque sin electrones para ejercer contra-presión contra la fuerza gravitacional, las estrellas colapsarían rápidamente en estrellas de neutrones o agujeros negros.

CUADRO MATEMÁTICO 19.3 UN CASO DE FINE-TUNING: LA DIFERENCIA DE MASA ENTRE PROTÓN Y NEUTRÓN Y SU RELACIÓN CON LA MASA DEL ELECTRÓN

Vimos (en el cuadro matemático 19.2) que la diferencia de masa entre neutrón y protón Δm es un poco mayor que la masa del electrón m_e .⁹⁹⁰

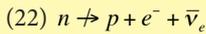
$$(19) \Delta m - m_e = 1.396 \text{ MeV} - 0.511 \text{ MeV} = 0.883 \text{ MeV} \Rightarrow \Delta m - m_e \geq 0 \Rightarrow$$

$$(20) \Delta m \geq m_e$$

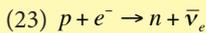
En el caso de que $\Delta m < m_e$, ni siquiera habría manera de producir helio, y el resultado sería un Universo de puros neutrones. La diferencia de masa Δm entre un neutrón m_n y un protón m_p , es la milésima parte de la masa del protón.

$$(21) \frac{\Delta m}{m_p} = \frac{m_n - m_p}{m_p} = \frac{939.6 - 938.3}{938.3} \cong 0.0014 = 0.14\%$$

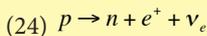
Ahora bien, si la diferencia de masa Δm hubiera sido solamente una tercera parte de este valor empírico, los neutrones libres no podrían decaer en protones, porque no tendrían masa suficiente para producir el electrón requerido, dado que una diferencia de 0.433 MeV no cubre los 0.511 MeV que son requeridos por el electrón. No sería posible, entonces, el siguiente decaimiento:



y en lugar de (22), se daría el decaimiento al revés:



Si la masa del neutrón fuera aún menos, p.e., el 98.8% de su valor empírico, el neutrón tendría menos masa que el protón, de modo que el decaimiento de la ecuación (20) sería igualmente imposible. El nucleón inestable sería el protón por el siguiente decaimiento:



En ambos casos, a saber, (23) y (24), las estructuras del Universo, decaerían en estructuras de neutrones por la aniquilación $p e^-$.⁹⁹¹ No existirían protones, ni tampoco electrones y, por lo tanto, no habría átomos.

Sección 19.3. El inicio de fusión nuclear en las estrellas

Antes⁹⁹² analizamos la razón de la fuerza gravitacional y la energía cinética original del *Big Bang*. Gracias al hecho de que la fuerza gravitacional y el ímpetu de la explosión original del *Big Bang* estaban finamente ajustados, se formaron en el Universo nubes de hidrógeno y helio que empezaron a colapsarse para formar estrellas. ¿Qué sucederá con estas estrellas? ¿Qué tan larga es su vida? ¿Habrá

⁹⁹⁰ Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 63, reproducida en John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 400

⁹⁹¹ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 400

⁹⁹² En la Sección 19.1

fusión de elementos más pesados? Esto depende de *la interacción de tres fuerzas, a saber, la fuerza gravitacional, la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear fuerte*. Existen dos posibilidades. La primera posibilidad es que la masa estelar no rebasa una frontera crítica, de modo que la presión y la temperatura en el interior de la estrella no son suficientes para que se supere la repulsión electromagnética entre los protones, ni para que se inicie la fusión nuclear, que solamente se desencadena a distancias muy cortas entre los protones. La estrella termina su vida como enano café. Esto es, por ejemplo, el caso de Júpiter.

La segunda posibilidad es que la masa estelar rebasa una frontera crítica. Si la masa estelar rebasa esta frontera crítica, la gravedad hará su trabajo y alimenta la presión, la densidad y la temperatura de la esfera al grado de vencer la repulsión electromagnética entre los protones, así como vimos en la Sección 17.1. Una vez que la gravedad haya vencido la repulsión electromagnética de los protones, habrá suficientes protones que chocan con suficiente velocidad entre ellos para desencadenar los procesos de fusión nuclear. Cuando hay muchos choques de protones y neutrones de muy alta velocidad, de vez en cuando se fusionan dos núcleos de deuterio, que consiste de un protón más un neutrón, para formar un núcleo de helio. Si la probabilidad de que dos protones se fusionen —transformándose un protón en un neutrón en el proceso—, es $p = 10^{-n}$ y si se dan 10^n choques de protones de alta velocidad por segundo por centímetro cúbico, se sigue que cada segundo, en cada centímetro cúbico, se produce un átomo de helio.

¿Qué pasaría si la fuerza gravitacional no fuera tan débil? Supongamos que fuera un millón de veces más fuerte y que la razón de la fuerza electromagnética y la fuerza gravitacional no fuera, entonces, 10^{36} sino 10^{30} . En este caso, los objetos no tendrían que ser tan grandes para ser competitivos con las otras fuerzas. Los procesos de fusión se activarían en estrellas mucho más pequeñas con una vida un millón de veces más corta. Una estrella típica acabaría su combustible en 10,000 años, ¡antes de que la evolución orgánica hubiera siquiera iniciado!⁹⁹³ Si suponemos que la evolución biológica, en general, necesita tanto tiempo como ha necesitado en la Tierra, se sigue que en el caso de una fuerza gravitacional más fuerte, no habría vida compleja, como la conocemos ahora, en el Universo.

En el caso contrario, con una fuerza gravitacional más débil, ciertamente serían posibles estructuras complejas de la larga duración. Pero, en el caso de una fuerza gravitacional un millón de veces más débil, el Sol tendría que ser casi un millón de veces más voluminoso, para desencadenar el proceso de fusión nuclear que da energía a planetas como la Tierra, y este planeta tendría que ser casi un millón de veces más voluminoso para retener la atmósfera. El mayor volumen compensaría la menor fuerza gravitacional. Pero, para lograr este volumen habría obstáculos insuperables. Una estrella un millón de veces más voluminoso que el Sol, sería el resultado del colapso gravitacional de un número de átomos de hidrógeno un millón de veces mayor que los del Sol. Pero, esto supone que una fuerza gravitacional un millón de veces más débil, habría que provocar el colapso de un número de átomos un millón de veces mayor. Esta hazaña sería casi imposible y se daría en muy contadas excepciones, lo que generaría los problemas que analizaremos en la Sección 19.7.

En conclusión, el inicio de la fusión nuclear en las estrellas dependió de un ajuste fino de la interacción de tres fuerzas fundamentales, a saber, la gravitacional, la electromagnética, y la nuclear fuerte. Tal vez el lector objete que un ajuste de la fuerza gravitacional con una precisión de $\pm 10^6$ no es tan fino. En realidad, sí lo es, porque $\pm 10^6 / 10^{36} = \pm 1 / 10^{30}$. Por lo tanto, el ajuste de la fuerza gravitacional se da con una precisión de uno entre un millón de millones de millones de millones de millones, para que en las estrellas emergiera la fusión nuclear.

CUADRO MATEMÁTICO 19.4 UN CASO APARENTE DE FINE-TUNING

En el cuadro matemático 17.2 de la Sección 17.1 vimos cuál es la frontera crítica donde empieza la fusión nuclear en una esfera de gas de hidrógeno. Cuando la esfera tiene aproximadamente 10^{57} átomos de hidrógeno, el trabajo realizado por la fuerza gravitacional supera la fuerza con que los protones, con carga positiva, se repelen.

Este número 10^{57} es casi igual a $N \approx 10^{60}$ que aparece en las ‘coincidencias de números’ que reportó Bondi en su libro *Cosmology* de 1959. Bondi había observado la ‘coincidencia’ de que las estrellas tienen una masa equivalente al inverso de la razón de la fuerza gravitacional y la fuerza nuclear fuerte:

$$(25) \quad M \approx 1/\alpha_G \approx 10^{40},$$

que a su vez es el cuadrado de la masa del protón, expresado como múltiple de la masa de Planck

$$(26) \quad m_p \approx 10^{-20} * m_{pl} \Rightarrow \alpha_G \approx (m_p / m_{pl})^2 \approx (10^{-20})^2 \approx 10^{-40}.$$

Dado que, por definición, el número de protones N de una estrella es igual a la masa de la estrella dividida por la masa de un protón, este número de protones es (27) $N \approx 10^{40} / 10^{-20} \approx 10^{60}$. Con razón comenta Brandon Carter que aquí no se trata de ningún caso del ‘principio antrópico débil’ sino de un hecho perfectamente explicable en términos de las masas y fuerzas ya definidas. Sin embargo, ni Bondi ni Carter⁹⁹⁴ dan esta explicación, que luego fue sugerida por Rees,⁹⁹⁵ y que acabo de elaborar con más detalle en este cuadro matemático.

Sección 19.4. La fusión de helio, carbono, oxígeno y otros elementos en las estrellas

Una vez iniciado la fusión nuclear que transforma hidrógeno en helio, son necesarias condiciones adicionales para que se produzcan elementos más pesados que el helio. Este punto nos lleva al tema más conocido de toda la literatura sobre el *fine-tuning*, a saber, la *producción de carbono y oxígeno en las estrellas*. La importancia de hidrógeno, carbono y oxígeno para la bioquímica de la vida es bastante conocida.⁹⁹⁶ Se trata de los tres elementos más numerosos en los organismos vivos. Dos moléculas de suma importancia para la vida se derivan de ellos, en primer lugar, el dióxido de carbono

⁹⁹⁴ Brandon Carter, “Large Number Coincidences and the Anthropic Principle in Cosmology”, en: Malcolm Longair, ed., *Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data* (1974):292

⁹⁹⁵ Martin Rees, *Just Six Numbers* (2000): 180-181, nota 1 capítulo 3

⁹⁹⁶ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 510-575

usado por las plantas para producir oxígeno, siendo las plantas necesarias como primer eslabón en la cadena alimenticia de los animales, y, en segundo lugar, el agua que por sus propiedades especiales tiene una significancia primordial para la evolución y permanencia de la vida en la Tierra.⁹⁹⁷ Cuatro de los seis electrones del carbono pueden ser compartidos con otros elementos, es decir, un átomo de carbono tiene valencia 4 y puede, en consecuencia, atar otros cuatro átomos, lo que le da una significancia única como piedra angular en la construcción de moléculas orgánicas.⁹⁹⁸ El helio no forma parte de las moléculas orgánicas, pero es un eslabón imprescindible en la cadena de fusión, desde el hidrógeno hasta el carbono y oxígeno en las estrellas.

En la Sección 17.2 analicé cómo se forma helio (${}^4\text{He}^2$) a partir de hidrógeno (${}^1\text{H}^1$), mediante deuterio (${}^2\text{H}^1$ = un protón + un neutrón). La primera reacción, en donde dos protones fusionan para formar un núcleo de deuterio, tiene una probabilidad muy baja. Un protón en el centro del Sol tarda en promedio 10^{10} años para colisionar con otro protón y formar deuterio. Dos protones no forman un diprotón (${}^2\text{H}^2$), porque la fuerza nuclear no es suficientemente fuerte para superar la repulsión electromagnética entre dos protones. Solamente si un protón, en el choque con otro, se transforma en un neutrón, los dos forman un núcleo de deuterio —protón más neutrón—. Después, dos núcleos de deuterio pueden fusionarse para formar un núcleo de helio —dos protones más dos neutrones—, porque *los dos neutrones en el núcleo de helio aportan dos unidades de fuerza nuclear fuerte, sin añadir nada a la repulsión eléctrica en el núcleo, lo que permite que la fuerza nuclear conjunta de cuatro nucleones supere la repulsión eléctrica de dos protones.*

Si la fuerza nuclear hubiera sido un poco más fuerte de lo que es, habría sido capaz de vencer la repulsión electromagnética de dos protones y se habría formado diprotón (${}^2\text{H}^2$). En este caso, *en el Big Bang, todos los protones se habrían fusionado para formar diprotones en los primeros minutos del Big Bang.* Al no haber ya hidrógeno para transformarse en deuterio, y luego en helio, ni helio para transformarse en carbono y oxígeno, y otros elementos más pesados, ni hidrógeno y oxígeno para formar moléculas de agua, etcétera, no habrían emergido planetas con elementos pesados, ni agua ni vida.⁹⁹⁹ Podemos marcar el intervalo de este *fine-tuning* con precisión. ¡Si α_s tuviera un valor de 3.4% a 3.7% más que el empírico, la fuerza nuclear fuerte sería capaz de superar la repulsión electromagnética de dos protones y fusionarlos en un solo núcleo y tendríamos lo que se conoce en la literatura como el ‘*desastre diprotón.*’ Comenta Barrow:

*La existencia de deuterio y la no-existencia del diprotón depende precariamente del valor preciso de la fuerza nuclear fuerte. Si la interacción fuerte fuera un poco más fuerte, el diprotón sería un núcleo estable y esto tendría consecuencias desastrosas, a saber, todo el hidrógeno del Universo se habría transformado en diprotones durante los primeros minutos del Big Bang y no existirían otros compuestos de hidrógeno ni estrellas de larga vida. ¡Si el diprotón existiera, nosotros no existiríamos!*¹⁰⁰⁰

⁹⁹⁷ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 524-541

⁹⁹⁸ Véase la Sección 10.1

⁹⁹⁹ Martin Rees, *Just Six Numbers* (1999): 55

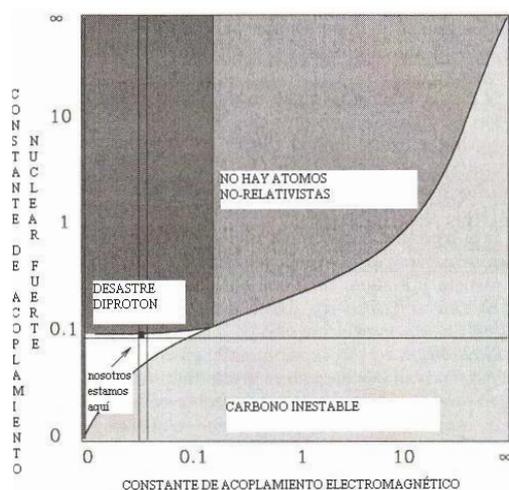
¹⁰⁰⁰ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 322

Y vice-versa, si la fuerza nuclear fuerte tuviera un valor de 9% a 11% *menos* que el valor empírico, un protón no podría pegarse a un neutrón¹⁰⁰¹ y si faltara este deuterio (=neutrón más protón), faltaría el eslabón principal de la cadena de transformación de hidrógeno en helio en las estrellas y tendríamos un Universo de puro hidrógeno sin química ni fusión nuclear.

En síntesis, *si la fuerza nuclear fuerte hubiera sido un poco más fuerte de lo que es en los hechos, tendríamos un Universo de puros diprotones. Y si fuera un poco más débil, tendríamos un Universo de puro hidrógeno.* El hecho de que la fuerza nuclear fuerte se encuentra en la estrecha región, entre este límite superior y este límite inferior, es un ejemplo de *fine-tuning*, como se puede apreciar en la siguiente gráfica.¹⁰⁰²

Además, si $\alpha_s \leq 0.3\alpha^{1/2}$, el núcleo de carbono sería inestable y no habría vida basada en carbono y oxígeno.¹⁰⁰³

GRÁFICA. LOS LÍMITES IMPUESTOS A α_s Y α POR EL HECHO DE QUE ESTAMOS AQUÍ¹⁰⁰⁴



Este *fine-tuning* también es necesario para la producción de *carbono* y *oxígeno*. En la Sección 17.2 he analizado con cierto detalle cómo se producen el carbono y oxígeno, dos elementos indispensables para la vida, en el corazón de las estrellas por procesos de fusión nuclear. Vimos que el carbono tiene 'suerte', dos veces. En primer lugar, porque existe un estado 'excitado' de carbono, que permite entrar en resonancia en la fusión de berilio y helio, al grado de acelerar exponencialmente el proceso de fusión. Gracias a *la rapidez de la fusión*, el carbono puede producirse antes de que el berilio termine

¹⁰⁰¹ Martin Rees, *Just Six Numbers* (1999):55; John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 322

¹⁰⁰² Max Tegmark, "Is 'the theory of everything' merely the ultimate ensemble theory," en: *Annals of Physics*, vol.270 (1998): 14-16; John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 320-322; John Barrow, *The Constants of Nature* (2002): 168

¹⁰⁰³ Max Tegmark, "Is 'the theory of everything' merely the ultimate ensemble theory," en: *Annals of Physics*, vol. 270 (1998): 15

¹⁰⁰⁴ Gráfica de Tegmark, "Is 'the theory of everything' merely the ultimate ensemble theory," en: *Annals of Physics*, vol. 270 (1998):16: Adaptada de: John Barrow, *The Constants of Nature* (2002): 168

su vida tan extremadamente corta. La segunda vez que el carbono tiene ‘suerte’, es por la falta de resonancia en la fusión de carbono y helio, lo que desacelera la rapidez de la fusión nuclear suficientemente, para que *no* todo el carbono se transforme en oxígeno. Solamente por el ajuste fino de la fuerza nuclear fuerte, que influye decisivamente en el valor de la tasa de reacción en procesos de fusión nuclear se formaron tanto carbono como oxígeno en cantidades abundantes, lo que permitió después la evolución de la vida. Comenta Penrose esta circunstancia en términos del *fine-tuning*: “Es notable que los constantes de la Naturaleza están ajustados de tal manera que estos niveles de energía estuvieran en el valor apropiado, para que la vida como la conocemos pudiera emerger”¹⁰⁰⁵

Cuando Hoyle descubrió todo esto, todavía no se podía calcular este *fine-tuning* que permite la producción de carbono y oxígeno. Pero, en el 1998, Oberhummer, Pichler y Scóto produjeron un breve estudio de astrofísica nuclear, demostrando la extrema dependencia del valor de la tasa de fusión nuclear con respecto al factor de fuerza nuclear,¹⁰⁰⁶ del cual reproduzco la siguiente tabla.

TABLA. LA VARIACIÓN DE LA TASA DE REACCIÓN NUCLEAR TRIPLE-ALPHA A UNA TEMPERATURA DE 10^8 K, COMO FUNCIÓN DEL FACTOR DE FUERZA NUCLEAR p

<i>Interacción nucleón-nucleón efectiva</i>	<i>Modelo MN</i>	<i>Modelo V1</i>	<i>Modelo V2</i>
Factor de fuerza p	$f(p)^{1007}$	$f(p)$	$f(p)$
1.002	422	337	64.4
1.001	20.2	11.4	7.9
1.000	1.0	1.0	1.0
0.999	0.05	0.09	0.13
0.998	0.003	0.008	0.02

Obviamente, el aumento del factor de fuerza nuclear p en la tabla anterior, no repercute negativamente en la cantidad de carbono producido, pero sí afectaría, como ya vimos, la producción de oxígeno. El factor de fuerza nuclear debe ser ajustado muy finamente, para que pueda haber tanto carbono como oxígeno. En el año 2000, los mismos tres físicos nucleares publicaron en la revista *Science* sus conclusiones al respecto en forma más completa.¹⁰⁰⁸ Los procesos de fusión nuclear dependen de dos fuerzas fundamentales de la naturaleza, a saber, en primer lugar, la fuerza nuclear

¹⁰⁰⁵ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2005):759

¹⁰⁰⁶ Heinz Oberhummer, Rudolf Pichler & Attila Csóto, “The Triple-Alpha Process and Its Anthropic Significance,” en: Nikos Prantzos & Sotoris Harissopoulis, eds., *Nuclei in the Cosmos V. Proceedings of the International Symposium on Nuclear Astrophysics* (1998): 119-122

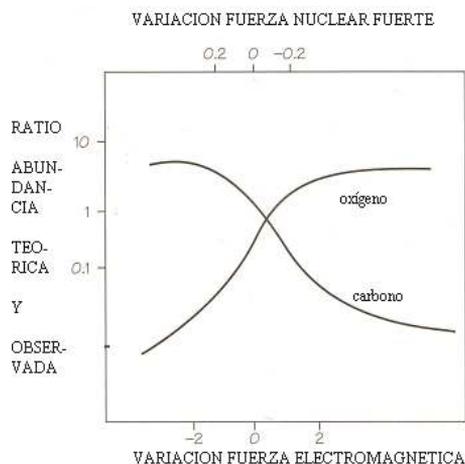
¹⁰⁰⁷ El aumento o la reducción de la reacción triple-alpha están dados por $f(p) = \frac{r_{3\alpha}(p)}{r_{3\alpha}} \approx \exp\left(\frac{\epsilon - \epsilon(p)}{k_B T}\right)$ en donde ϵ es la energía de la resonancia y $r_{3\alpha} = 3^{3/2} N_\alpha^3 \left(\frac{2\pi\hbar^2}{M_\alpha k_B T}\right)^3 \frac{\Gamma_\gamma}{\hbar} \exp\left(-\frac{\epsilon}{k_B T}\right)$, en donde M_α es la densidad de masa de α , N_α su densidad de número, T la temperatura del plasma de la estrella, y $\omega\gamma \approx \Gamma_\gamma$ es la fuerza de la resonancia.

¹⁰⁰⁸ Heinz Oberhummer, Attila Csoto & Helmut Schlattl, “Stellar Production Rates of Carbon and Its Abundance in the Universe,” en: *Science*, vol. 289 (2000): 88-90

fuerte que aglutina los bariones en los núcleos, cuando chocan en circunstancias de alta temperatura y alta densidad, superando la repulsión electromagnética que los protones experimentan por su carga positiva, y, en segundo lugar, la fuerza electromagnética que debe ser superada. Hicieron sus cálculos para estrellas con una masa 20 veces, 5 veces y 1.3 veces la del Sol. La conclusión Oberhummer y otros es notable:

*“Concluimos que una variación de más de 0.5% en la fuerza de la interacción nuclear fuerte o de más de 4% en el valor de la fuerza [electromagnética] de Coulomb, destruiría casi por completo, ó todo el carbono, ó todo el oxígeno en cada estrella. Esto implica que, independientemente de la evolución de las estrellas, la contribución de cada estrella a la abundancia de carbono u oxígeno en el material intra-estelar sería insignificante. En consecuencia, en tal caso, la creación de vida basada en carbono [y oxígeno] sería fuertemente desfavorecida. (...) Por lo tanto, los resultados de este trabajo son relevantes para el principio cosmológico antrópico.”*¹⁰⁰⁹

GRÁFICA. LA EXISTENCIA ABUNDANTE DE CARBONO Y OXÍGENO EN EL UNIVERSO DEPENDE DEL AJUSTE FINO DE LA FUERZA NUCLEAR FUERTE Y LA FUERZA ELECTROMAGNÉTICA¹⁰¹⁰



El principio antrópico al que los autores hacen referencia existe en dos ediciones. En su forma ‘débil’ no es más que una afirmación del principio de la causalidad, a saber, que las leyes naturales deben ser tales (la causa) que han permitido el surgimiento de la vida (el efecto), unos 14 mil millones de años después del *Big Bang* (porque aquí estamos analizándolas). En su forma ‘fuerte’, el principio antrópico es un enunciado teológico y afirma que las leyes naturales del Universo revelan un diseño inteligente por un creador divino a favor de la vida humana.¹⁰¹¹ Por lo tanto, ni el principio antrópico

¹⁰⁰⁹ Heinz Oberhummer, Attila Csoto & Helmut Schlattl, “Stellar Production Rates of Carbon and Its Abundance in the Universe”, en: *Science*, vol. 289 (2000): 90

¹⁰¹⁰ Gráfica de Heinz Oberhummer Attila Csoto & Helmut Schlattl, en: *Science*, vol. 289 (2000); adaptación basada en: John Barrow, *The Constants of Nature* (2002):155

¹⁰¹¹ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986)

débil, ni el principio antrópico fuerte son enunciados científicos, razón por la cual los analizaremos más detenidamente en la parte metafísica de este libro.¹⁰¹²

En un Congreso en Nueva York, en 1999, Steven Weinberg expresó su duda con respecto al *fine-tuning* del Universo.¹⁰¹³ Su argumento contra el *fine-tuning* va en dos pasos: primero *reduce* el fenómeno del *fine-tuning* al caso particular del *fine-tuning* presente en la producción de un estado excitado del núcleo de carbono y luego *niega* el *fine-tuning* en esta cadena triple alpha. Veamos ambos pasos. Con respecto al primer paso, consta que el *fine-tuning* es mucho más extenso de lo que Weinberg implícitamente admite al reducirlo al caso de la producción de carbono en las estrellas. En esta sección, analizo no menos que *siete diferentes ejemplos* de *fine-tuning*. Con respecto al segundo paso, Weinberg, para justificar su tesis de que el caso de la producción de un estado excitado del núcleo de carbono no implica *fine-tuning*, hace referencia a dos estudios, de Hong y otros, de 1999, y de Livio y otros¹⁰¹⁴, de 1989, argumentando que el carbono tiene el nivel de energía necesaria para nacer ‘naturalmente’ del encuentro de helio y berilio ocho. Weinberg no hace referencia a otros dos artículos, de Pichler y otros,¹⁰¹⁵ de 1997, y de Fedorov y Jensen,¹⁰¹⁶ de 1996, que critican los estudios de Hong y Livio, aunque fueron publicados antes de la plática de Weinberg en el Congreso de 1999. Estos autores refutan el enunciado de Hong y Livio y otros, comprobando que el carbono se genera, efectivamente, por la resonancia en el proceso triple-alpha descubierto primero por Hoyle. Oberhummer señala que los valores de la energía de la masa en reposo de berilio ocho y de carbono doce, manejados por Hong y Lee “*están muy lejos de sus valores empíricos, lo que hace su modelo muy cuestionable.*”¹⁰¹⁷ Tampoco hizo Weinberg referencia al primer artículo de Oberhummer, Pichler y Scóto, publicado un año antes del Congreso de 1999. En su libro de 2009, sobre cosmología,¹⁰¹⁸ no hay una sola referencia al fenómeno del *fine-tuning*, ni a autores como Fedorov, Jensen, Oberhummer, Pichler, o Scóto.

Sección 19.5. La existencia de planetas y de órbitas planetarias casi-circulares y estables

Antes de ver las condiciones de la estabilidad de las órbitas planetarias, es necesario ver primero las condiciones de *la existencia misma de los planetas*. Según un estudio clásico de Brandon Carter, la división de las estrellas en la secuencia principal, entre gigantes azules y enanas rojas, depende de manera crítica de la interrelación ajustada de la constante de acoplamiento gravitacional, la constante de acoplamiento electromagnético y la razón de masas de protón y electrón. Dice Carter, que “*esta*

¹⁰¹² Véanse las Secciones 25 y 26

¹⁰¹³ Steven Weinberg, “A Universe with No Designer”, en: *Cosmic Questions* (2001): 169-174

¹⁰¹⁴ S. Hong & S. Lee, “Alpha Chain Structure in ¹²C,” en: *Journal of Korean Physics* (1999): 46-48. Mario Livio, D. Howell, A. Weiss & J. Truran, “The anthropic significance of the existence of an excited state of ¹²C,” en: *Nature* (1989): 281-284

¹⁰¹⁵ Rudolf Pichler, Heinz Oberhummer, Attila Csóto & S. Moszkowski, “Three alpha structures en ¹²C,” en: *Nuclear Physics A*, vol. 618 (1997): 55-64

¹⁰¹⁶ D. Fedorov & A. Jensen, “The Three-Body Continuum Coulomb Problem and the 3α Structure of ¹²C,” en: *Physics Letters B*, vol. 389 (1996): 631-636

¹⁰¹⁷ Citado en Guillermo Gonzalez & Jay Richards, *The Privileged Planet* (2004): 392, note 8. Véase también Heinz Oberhummer, Rudolf Pichler & Attila Csóto, “The Triple-Alpha Process and Its Anthropic Significance,” en: Nikos Prantzos & Soteris Harissopoulis, eds., *Nuclei in the Cosmos V. Proceedings of the International Symposium on Nuclear Astrophysics* (1998)

¹⁰¹⁸ Steven Weinberg, *Cosmology* (2009)

condición —por una coincidencia notable— apenas (*only just*) se satisfice.”¹⁰¹⁹ Si la constante de acoplamiento gravitacional hubiera sido más fuerte, o la constante de acoplamiento electromagnético un poco más débil, entonces, la secuencia principal existiría enteramente de gigantes azules radiativas”, lo que “sería incompatible con la formación de planetas y, por lo tanto, de observadores.”¹⁰²⁰ Esto, lo dijo Carter en 1974. Hoy día, se admiten sistemas planetarios un poco más a la izquierda arriba del Sol (acercándose a las gigantes azules) en el diagrama de Hertzsprung-Russell. Por otro lado, aún así, los sistemas solares con planetas serían pocos, lo que afectaría negativamente la probabilidad de la emergencia de vida compleja en el Universo, como veremos más adelante.¹⁰²¹

CUADRO MATEMÁTICO 19.5 FINE-TUNING EN LA SECUENCIA PRINCIPAL

Según un estudio clásico de Brandon Carter, la división de las estrellas en la secuencia principal, entre gigantes azules y enanas rojas, depende de manera crítica de la interrelación de la constante de acoplamiento gravitacional α_G , la constante de acoplamiento electromagnético α y el ratio de masas β , a saber,

$$(28) \sqrt{\alpha_G} \geq \alpha^6 \beta^2.$$

Si le ponemos los valores empíricos de estas constantes a-dimensionales (véase el apéndice con unidades y constantes) a esta ecuación, obtenemos:

$$(29) 7.75 * 10^{-20} \geq 4.48 * 10^{-20},$$

de modo que esta condición —por una coincidencia notable— apenas se satisfice. Si la constante de acoplamiento gravitacional hubiera sido más fuerte, o la constante de acoplamiento electromagnético un poco más débil, tendríamos:

$$(30) \sqrt{\alpha_G} \gg \alpha^6 \beta^2$$

y entonces, la secuencia principal existiría enteramente de gigantes azules radiativas, lo que sería incompatible con la formación de planetas y, por lo tanto, de observadores.

Veamos ahora la cuestión de la estabilidad de las órbitas planetarias. En los *Collected Scientific Papers* de Paul Ehrenfest, el editor, Martin Klein, reprodujo en 1959, en inglés, un artículo de Ehrenfest, originalmente publicado en 1920, en alemán, en los *Annalen der Physik*, bajo el título *Which roles does the three-dimensionality of space play in the basic laws of physics?* Ehrenfest prueba que solamente en un Universo con tres dimensiones espaciales pueden existir órbitas planetarias estables. Su artículo, como está, es algo inaccesible para el lector de hoy, razón por la cual, dada la importancia de su tesis, la reproduzco en el Apéndice III con más detalle. Aquí me limito a una breve síntesis verbal.

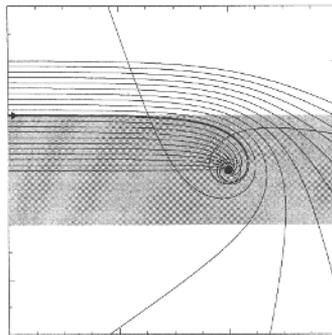
¹⁰¹⁹ Brandon Carter, en: Malcolm Longair, ed., *Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data* (1974): 296-297. Carter usa los símbolos $m_p^{-2} = (m_p/m_{pl})^2$, e^2 y m_e/m_p para indicar α_G , α y β , respectivamente. Con los símbolos usados por Carter, la ecuación se ve así: $m_p \geq e^{12} (m_e/m_p)^2$

¹⁰²⁰ Brandon Carter, en: *Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data* (1974): 297.

¹⁰²¹ Véase la Sección 19.7.

Ehrenfest presenta la siguiente tesis: “Existe una diferencia característica entre dos o tres dimensiones [espaciales], por un lado, y un número de dimensiones mayor que tres, por otro lado, con respecto a la estabilidad de la órbita circular. Mientras en R_3 la órbita sigue siendo finita cuando se produce una pequeña perturbación con una energía no demasiado grande (..), en el caso de R_4 , R_5 , R_6 , etcétera, las órbitas circulares, aunque son, por supuesto, todavía posibles, se desbaratan ante la menor perturbación, encaminando al planeta en una espiral de caída en el cuerpo central, o hacia fuera, en el infinito”¹⁰²². El siguiente esquema, de Tegmark, es una ilustración de la imposibilidad de órbitas planetarias estables en un Universo de cuatro dimensiones espaciales: el cuerpo de masa menor ó cae en el cuerpo de masa mayor, ó es lanzado al infinito.

IMAGEN. EL PROBLEMA DE DOS CUERPOS EN UN UNIVERSO DE $N \geq 4$ DIMENSIONES ESPACIALES¹⁰²³



La parte gris de la imagen contiene las trayectorias de objetos atraídos por otro objeto con cierta masa y revela que existen solamente dos posibilidades: ó caen en el objeto que los atrae gravitacionalmente, ó son desviados por este objeto y luego lanzados al infinito. Ehrenfest comprueba, entonces, que en un Universo de cuatro dimensiones espaciales o más, no pueden existir órbitas cerradas estables, y que éstas solamente se dan en un Universo de tres (o menos) dimensiones espaciales. En la siguiente tabla sintetizo algunos hallazgos de Ehrenfest que son relevantes en el contexto del *fine-tuning*:

TABLA. SÍNTESIS DE ALGUNAS CONCLUSIONES DE EHRENFEST

Número de dimensiones del espacio	La velocidad radial tiene valores reales: $v_r = \pm\sqrt{\text{número}} > 0$	Órbitas cerradas y estables son posibles	Movimientos hacia la estrella o hacia el infinito son posibles
$n = 3$	Si	Si	Si
$n = 4$	No	No	Si
$n \geq 5$	No	No	Si

¹⁰²² Paul Ehrenfest, “Which roles does the three-dimensionality of area play in the basic laws of physics?”, en: *Collected Scientific Papers*, ed. por Martin Klein (1959): 440-441.

¹⁰²³ Imagen de Max Tegmark, “Is ‘the theory of everything’ merely the ultimate ensemble theory,” en: *Annals of Physics*, vol. 270 (1998): 17

Tegmark amplió el análisis de Ehrenfest, variando tanto el número de dimensiones espaciales como temporales de 0 a 5, lo que da $6 \times 6 = 36$ combinaciones y saca la conclusión que *homo sapiens* “solamente [es] viable en un Universo de una dimensión temporal y tres dimensiones espaciales”.¹⁰²⁴

Sección 19.6. La existencia de átomos estables y moléculas complejas

Vimos, en la Sección 19.2, las condiciones necesarias para que siquiera existan protones estables y electrones, necesarios para que puedan existir átomos. A continuación analizaré las condiciones necesarias para que estos átomos, que generalmente consisten de protones, neutrones y electrones, sean estables. Esto depende de la relación de masas del neutrón, protón y electrón, que también es primordial para la conservación de protones estables (véase 18.2), y depende también de la relación de la fuerza nuclear fuerte, la nuclear débil y la electromagnética y del número de dimensiones espaciales en el Universo.

Podemos extender el análisis de Ehrenfest y Tegmark sobre Universos con $N \geq 4$ dimensiones espaciales del macro-mundo de sistemas solares al micro-mundo de los átomos y moléculas. Estudios recientes de Tangherlini¹⁰²⁵ y de Gurevich & Mostapenenko¹⁰²⁶ resuelven las ecuaciones de Schrödinger para el átomo de hidrógeno para N dimensiones espaciales en general y concluyen que no solamente serían imposibles las macro-órbitas estables de planetas alrededor de una estrella, sino tampoco serían posibles las micro-órbitas estables de electrones alrededor del núcleo. En las palabras de Gurevich y Mostepanenko: “*materia atómica y, por lo tanto, vida, solamente son posibles en un espacio 3-dimensional*”¹⁰²⁷; o en las palabras de Barrow, “*átomos estables, química y vida solamente pueden existir en $N < 4$ dimensiones*” espaciales y “*no existen órbitas cerradas estables para $N > 3$ dimensiones espaciales*”.¹⁰²⁸

No solamente es importante el número de dimensiones espaciales para la existencia de átomos estables, sino también un ajuste fino de los valores de ciertas constantes, como veremos a continuación. Para la existencia de átomos y moléculas complejas, ya no importa la fuerza gravitacional, que es tan débil que a escala pequeña casi no cuenta. Sin embargo, a escala microscópica quedan dos razones o tasas de suma importancia:

- 1) La constante de acoplamiento electromagnético $\alpha = 1/137$, lo que significa que la fuerza nuclear fuerte es 137 veces más fuerte que la fuerza electromagnética;
- 2) La relación de las masas del neutrón y protón, por un lado, y del electrón. En el apéndice con unidades y constantes registramos las masas de estas partículas: masa electrón, $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$; masa neutrón, $m_n = 939.6 \text{ MeV}/c^2$; y masa protón, $m_p = 938.3 \text{ MeV}/c^2$.

¹⁰²⁴ Max Tegmark, “Is ‘the theory of everything’ merely the ultimate ensemble theory,” en: *Annals of Physics*, vol. 270 (1998): 16-21

¹⁰²⁵ Frank Tangherlini, “Atoms in Higher Dimensions”, *Nuovo Cimento*, vol.27 (1963): 636

¹⁰²⁶ L. Gurevich & V. Mostepanenko, “On the existence of atoms in n-dimensional space”, *Physics Letters A*, vol. 35 (1971): 201-202

¹⁰²⁷ L. Gurevich & V. Mostepanenko, “On the existence of atoms in n-dimensional space”, *Physics Letters A*, vol. 35 (1971): 202

¹⁰²⁸ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 265

La razón de la masa del electrón y la masa del protón es $\beta = 1/1836$.¹⁰²⁹ El valor pequeño de esta constante adimensional garantiza que el núcleo tiene una ubicación estable, como señala Tegmark: “En una estructura estable y ordenada como, por ejemplo, una cromosoma, la fluctuación típica de un núcleo en relación al espacio intra-atómico es $\beta^{1/4}$, de modo que, para que tal estructura permanezca estable por períodos largos de tiempo, se debe de tener $\beta^{1/4} \ll 1$ ”.¹⁰³⁰ Lo mismo afirman Barrow y Tipler.¹⁰³¹

A continuación, analizaré la importancia de la razón de las fuerzas nuclear fuerte y electromagnética para la estabilidad del átomo. En la fusión nuclear del proceso triple alpha, en donde se produce carbono a partir de tres átomos de helio, y en la fusión de un átomo de helio y un átomo de carbono para generar oxígeno, los núcleos en proceso de fusión tienen más energía de la masa en reposo que el núcleo resultante de la fusión y se libera parte de la *energía de la masa en reposo* original en forma de energía de radiación.¹⁰³² En general, del hidrógeno hasta el hierro, la *fusión* nuclear libera *energía de la masa en reposo* y del uranio hasta el hierro, la *fisión* nuclear la libera. Desde el hidrógeno hasta el hierro, el núcleo resultante de la fusión tiene una *energía de la masa en reposo* menor que la suma de las *energías de masa en reposo* de los núcleos fusionados. Desde el uranio hasta el hierro, es al revés: los núcleos resultantes de la fisión tiene una *energía de la masa en reposo* menor que la *energía de la masa en reposo* del núcleo fisionado. En ambos casos, la diferencia de las *energías de masa en reposo* es la que se libera como energía de radiación en la fusión o fisión nuclear.

Ahora bien, *la estabilidad de núcleos ya generados por fusión nuclear es una función del valor exacto de la fuerza nuclear fuerte y la fuerza electromagnética*. La fuerza nuclear fuerte es causa de que los protones y neutrones en un núcleo se peguen, formando una esfera de nucleones. Pero esta fuerza solamente opera a distancias muy cortas, de modo que en núcleos grandes, los nucleones en los extremos ya no se atraen. Esto provoca que la fuerza eléctrica repulsiva entre protones empiece a deformar el núcleo, transformando la esfera perfecta en una forma ovalada, con la excentricidad e . La reubicación de nucleones en el núcleo es posible, porque el núcleo no es un punto de masa sólida, sino más bien se parece a una gota de agua flexible.¹⁰³³ Llega un momento en que la fuerza eléctrica repulsiva vence a la fuerza nuclear fuerte, y el núcleo se desintegra en dos partes. Dada esta razón de fuerzas en el núcleo, esta inestabilidad en núcleos grandes empieza, cuando (número de protones)² / (número atómico) es mayor que 49. Por ejemplo, el uranio tiene el número atómico 92 y un peso elemental de 238, es decir, contiene 92 protones y 146 neutrones, de modo que $(92^2 / 146) = 58$ y $58 > 49$. Los detalles de este punto se explican en el siguiente cuadro matemático.

¹⁰²⁹ $\beta = m_e / m_p = 1/1836$

¹⁰³⁰ Max Tegmark, “Is ‘the theory of everything’ merely the ultimate ensemble theory,” en: *Annals of Physics*, vol. 270 (1998): 15

¹⁰³¹ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 304

¹⁰³² Según la famosa fórmula $\Delta E_N = \Delta mc^2$.

¹⁰³³ El modelo de la gota de agua es de Niels Bohr, “Neutron capture and nuclear constitution”, *Nature*, vol. 137 (1936): 344-348; Hans Bethe y R. Bacher, “Nuclear Physics A. Stationary States of Nuclei”, *Reviews of Modern Physics* vol. 8 (1936): 82-229; y Carl Friedrich von Weizsäcker, *Die Atomkerne, Grundlagen und Anwendungen ihrer Theorie* (1937)

CUADRO MATEMÁTICO 19.6 LA ESTABILIDAD DE UN NÚCLEO

En los siguientes ejemplos, E_N representa la *energía de la masa en reposo* del núcleo; ΔE_N representa la parte de la masa que se transforma en energía de radiación; Z el número de protones y A el número atómico (el número de protones más neutrones):

$$(31) \text{ fusión de helio } \rightarrow \text{ carbono: } \Delta E_N = 3E_N(Z/3, A/3) - E_N(Z, A) > 0$$

$$(32) \text{ fisión del uranio: } \Delta E_N = E_N(Z, A) - 2E_N(Z/2, A/2) > 0$$

La frontera entre núcleos estables e inestables, se calcula de la siguiente manera. En la siguiente ecuación, existen dos constantes sin dimensión, a saber,

$$(33) a_s = 17.313 \text{ y } a_c = 0.702^{(1034)}:$$

$$(34) \Delta E_N = \frac{e^2}{5} (a_c Z^2 A^{-1/3} - 2a_s A^{2/3})$$

En los núcleos grandes, la frontera entre estabilidad e inestabilidad se da cuando $E_N = 0$ y si se rebasa esta frontera, el núcleo se desintegra:

$$(35) \Delta E_N = \frac{e^2}{5} (a_c Z^2 A^{-1/3} - 2a_s A^{2/3}) = 0 \Rightarrow \frac{Z^2}{A} = \frac{2a_s}{a_c} \cong 49,$$

de modo que *el núcleo es inestable*, cuando

$$(36) \frac{Z^2}{A} > 49$$

Si queremos *generalizar esta fórmula* para otros Universos pensables con diferentes valores de α_s y de α , tendríamos un núcleo inestable si:

$$(37) \frac{Z^2}{A} > 49 \left(\frac{\alpha_s}{10^{-1}} \right) \left(\frac{1/137}{\alpha} \right)^{(1035)}$$

Dado que en nuestro Universo $\alpha_s \cong 10^{-1}$ y $\alpha \cong 1/137$, la fórmula (37) se transforma en la (36).

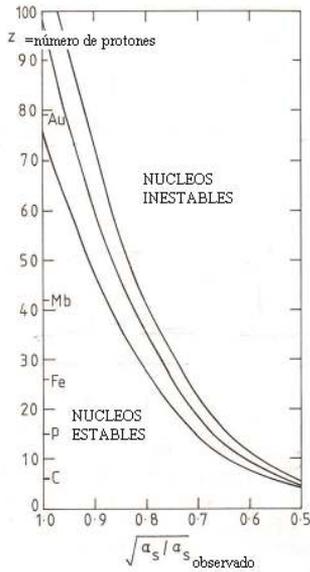
Una pequeña variación de la tasa de estas dos fuerzas, haría inestables núcleos con números atómicos mucho menores que uranio en la tabla de Mendeleev. Si se redujera en 50% la fuerza nuclear fuerte, el hierro sería inestable. En general, si la fuerza electromagnética fuera un poco más fuerte, o la fuerza nuclear fuerte un poco más débil, o ambas cosas, núcleos biológicamente esenciales como el carbono y el oxígeno no podrían existir (véase la siguiente gráfica):

“En síntesis, si la fuerza electromagnética hubiera sido más fuerte (un α incrementado) o la fuerza nuclear fuerte un poco más débil (un α_s disminuido), o ambas cosas, núcleos biológicamente esenciales como el carbono no habrían existido en la Naturaleza. Por ejemplo, si se incrementara la carga del electrón en un factor tres, núcleos con más de cinco protones no podrían existir y no sería posible ningún organismo vivo.”¹⁰³⁶

¹⁰³⁴ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 325

¹⁰³⁵ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 326

¹⁰³⁶ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 326

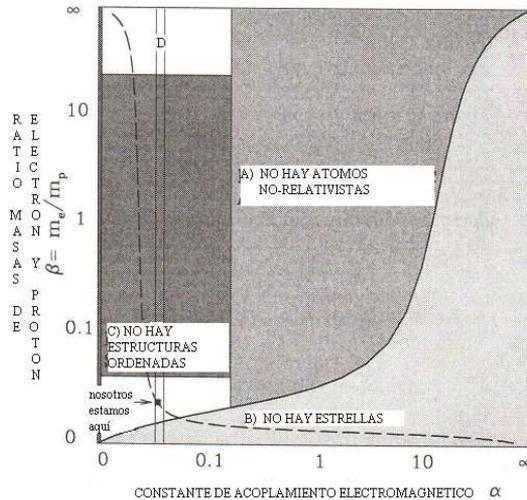


GRÁFICA. LA ESTABILIDAD DE LOS NÚCLEOS ATÓMICOS DEPENDE DEL VALOR DE LA FUERZA NUCLEAR FUERTE ¹⁰³⁷

Sección 19.7. Síntesis: calculando el *fine-tuning* del Universo

A modo de síntesis parcial, reproduzco el siguiente esquema que ilustra los límites impuestos a la variación de dos constantes sin dimensión, a saber, α y β por la existencia de estrellas con fusión nuclear, átomos estables y estructuras ordenadas.

GRÁFICA. LOS LÍMITES IMPUESTOS A α y β POR EL HECHO DE QUE EXISTEN ÁTOMOS ESTABLES ¹⁰³⁸



¹⁰³⁷ Gráfica de Paul Davies, en: *Journal of Physics A* (1972):1300, reproducida en John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (2002): 326

¹⁰³⁸ Gráfica de Tegmark, "Is 'the theory of everything' merely the ultimate ensemble theory," en: *Annals of Physics*, vol. 270 (1998): 15, adaptada de: John Barrow, *The Constants of Nature* (2002): 167 y por Guillermo Gonzalez & Jay Richards, *The Privileged Planet* (2004): 207

El área derecha superior del esquema tiene que ver con el hecho de que átomos y moléculas no relativistas son necesarios para la estabilidad del átomo o molécula, al impedir la creación de pares, y solamente se dan cuando la velocidad del electrón es baja, lo que es compatible con $\alpha = 1/137$, en el lado izquierdo inferior de esquema. En el lado izquierdo superior del esquema se lee “*no hay estructuras ordenadas*”. Un ejemplo de una estructura compleja es un cromosoma.

El área blanca del lado izquierdo abajo, que se encuentra entre las dos líneas verticales, es la región donde es posible la existencia de átomos estables y moléculas complejas. Dentro de esta región se encuentra el cuadrado negro donde nosotros nos encontramos.

Existen otros límites impuestos a la variación de las constantes, por el hecho de que estamos aquí, como, por ejemplo, el hecho de que el tamaño exacto de α y β permiten que la densidad máxima del agua se da en una temperatura cuatro grados por encima de su congelamiento y, sobre todo, varias propiedades químicas que permiten reproducción del ADN de alta fidelidad.¹⁰³⁹

El esquema no revela lo que pasaría si se variara la fuerza nuclear débil. En la Sección 19.2 analizamos este punto. Vimos que, si la fuerza nuclear débil fuera más débil, todo el hidrógeno se habría convertido en helio, en los primeros quince minutos del *Big Bang*, y al no haber hidrógeno, tampoco habríamos tenido moléculas basadas en hidrógeno, carbono y oxígeno, que son elementos necesarios para la vida como la conocemos.¹⁰⁴⁰

A modo de síntesis matemático, parto del análisis hecho por Smolin, para luego corregir y ampliarlo. Smolin hace una estimación global del grado de *fine-tuning* necesario para que puedan emerger “*estrellas que viven miles de millones de años*” con fusión nuclear, una condición previa necesaria para la producción de elementos pesados, los cuales, a su vez, son una condición previa necesaria para que pueda emerger vida en la Tierra.¹⁰⁴¹ El análisis, con matemáticas simples, se llevará a cabo en el siguiente cuadro matemático.

CUADRO MATEMÁTICO 19.7 EL FINE-TUNING ACUMULADO DEL UNIVERSO SEGÚN SMOLIN

Para el *fine-tuning* del Universo, dice Smolin, es necesario fijar el valor de tres constantes básicas, a saber *la constante de Planck* h , *la velocidad de la luz* c y *la constante gravitacional* G , que, entre las tres, definen la masa de Planck, y que se fije, además, la masa de cuatro partículas relativamente estables, a saber, protón, neutrón, electrón y neutrino, como múltiplos de la masa de Planck:

$$(38) \text{ constante de Planck } h = 6.6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Js ;}$$

$$(39) \text{ constante gravitacional } G = 6.673 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

$$(40) \text{ velocidad luz } c = 299,792,458 \text{ ms}^{-1} \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$(41) \text{ la masa de Planck } = 2.1 \cdot 10^{-8} \text{ kg} = hcG^{-1/2} = 1 m_{pl}$$

$$(42) \text{ masa neutrino } = m_\nu \approx 5 \cdot 10^{-35} \text{ kg} = 2.38 \cdot 10^{-27} m_{pl}$$

¹⁰³⁹ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): capítulo 4

¹⁰⁴⁰ Max Tegmark, “Is ‘the theory of everything’ merely the ultimate ensemble theory,” en: *Annals of Physics*, vol. 270 (1998): 16

¹⁰⁴¹ Lee Smolin, *The Life of the Cosmos* (1997) :325-326

$$(43) \text{ masa protón} = m_p = 1.6726231 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 7.96487 \cdot 10^{-20} m_{pl}$$

$$(44) \text{ masa neutrón} = m_n = 1.674928675 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 7.97585 \cdot 10^{-20} m_{pl}$$

$$(45) \text{ masa electrón} = m_e = 9.1093897 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 1/1836 m_p = 4.338 \cdot 10^{-23} m_{pl}$$

Para que en un Universo emerjan estrellas que viven miles de millones de años, las razones de las masas del neutrino, del protón, del neutrón y del electrón deben tomar los valores que se han corroborado empíricamente. La probabilidad de que exista la razón de protón y masa de Planck, tal como la observamos, en un juego del azar sería $p = 1/10^{19}$. Para que se formen núcleos estables, la masa del electrón debe ser una mínima fracción de la masa del protón, por ejemplo $1/1836$; la masa del neutrino ha de ser casi cero; y la masa del neutrón debe ser ligeramente mayor que la del protón, por ejemplo, 1.00138 . Cada uno de las últimas tres cosas tiene una probabilidad de aproximadamente $p = 1/10^{22}$. La probabilidad acumulada de estos cuatro ratios es $p = 1/10^{85}$. Smolin introduce también una constante cosmológica que debe ser ajustado con una precisión de $p = 1/10^{60}$. Acumulando todas estas probabilidades, obtenemos $p = 1/10^{145}$.

Hasta aquí, solamente hemos considerado la masa y la constante gravitacional. Para que haya átomos estables, y fusión exitosa de elementos pesados en las estrellas, deben, además, fijarse los valores *relativos* de las cuatro fuerzas básicas, a saber, la fuerza gravitacional, la fuerza nuclear fuerte y sus portadores, a saber, el gluón y mesón π ; la fuerza nuclear débil y sus portadores, a saber, los bosones W^+ , W^- y Z_0 ; y la fuerza electromagnética y su portador, el fotón.

Veamos primero los valores de las constantes dimensionales de las principales fuerzas, con dos versiones para la constante de la fuerza nuclear débil:

$$(46) \text{ fuerza gravitacional}^{1042} \quad \alpha_G \approx (m_p / m_{pl})^2 \approx 6.34392 \cdot 10^{-39}, \text{ rango infinito}$$

$$(47) \text{ fuerza electromagnética}^{1043} \quad \alpha_C = e^2 / (2\epsilon_0 hc) = 1/137.036^{(\text{nota1044})}, \text{ rango infinito}$$

$$(48) \text{ fuerza nuclear fuerte}^{1045} \quad \alpha_S(M_{Z^0}) \approx \frac{g_S^2}{\hbar c} \approx 0.1182^{(\text{nota1046})}, \text{ rango } 10^{-15} m^{(\text{nota 1047})}$$

¹⁰⁴² ¿Portador (especulativo) de la fuerza gravitacional: el gravitón, con masa=0 y spin=2?

¹⁰⁴³ Portador de la fuerza electromagnética: fotón γ con masa=0 y spin=1

¹⁰⁴⁴ La ecuación correcta es de Uzan,¹⁴ "The fundamental constants and their variation: observational and theoretical status", en: *Reviews of Modern Physics*, vol. 75 (2003): 405. La de John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 293 y John Barrow, *The Constants of Nature* (2002): 46, 86, $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{2\pi e^2}{\hbar c}$, es incorrecta.

¹⁰⁴⁵ Portador de la fuerza nuclear fuerte: entre quarks: gluons; entre nucleones: mesón π .

¹⁰⁴⁶ Siegfried Bethke, " α_s at Zinnowitz 2004" en <hep-ex/0407021v1>; el promedio de las mediciones es $\alpha_s \approx 0.12$. En 1997, Michael Schmelling, en <hep-ex/9701002 v1>, estimó $\alpha_s(M_Z) = 0.118 \pm 0.003$. A energías más altas sube su valor, por ejemplo $\alpha_s(Q^2 = 100(\text{GeV}/c)^2) \approx 0.16$, según Bogdan Povh & otros, *Particles and Nuclei* (2002): 109

¹⁰⁴⁷ Diámetro de un núcleo atómico de tamaño mediano

$$(49) \text{ fuerza nuclear débil}^{1048} \quad \alpha_w = g_w m_e^2 c / \hbar^3 \cong 6.4692 * 10^{-12}, \text{ rango } 10^{-18} m \text{ (nota } 1049)$$

$$(50) \text{ fuerza nuclear débil}^{1050} \quad \alpha_w = g_w m_p^2 c / \hbar^3 \cong 2.1816 * 10^{-5}, \text{ rango } 10^{-18} m$$

Las razones relativas de las constantes a-dimensionales son ls siguientes:

$$(51) \alpha_s / \alpha_c = 16.1934;$$

$$(52) \alpha_s / \alpha_w = 5.418 * 10^3;$$

$$(53) \alpha_s / \alpha_G = 1.8632 * 10^{37}$$

$$(54) \alpha_c / \alpha_G = 1.1506 * 10^{36};$$

$$(55) \alpha_c / \alpha_w = 3.345 * 10^2;$$

$$(56) \alpha_w / \alpha_G = 3.439 * 10^{33}$$

Además, deben de fijarse los respectivos rangos de estas fuerzas. Cuatro fuerza básicas dan tres razones relativas entre ellas. De estas tres, Smolin solamente fija dos, a saber, las razones de la fuerza nuclear débil y de la fuerza electromagnética con respecto a la fuerza nuclear fuerte, que él estima en $p = 1/10^2$ cada uno.¹⁰⁵¹ La probabilidad acumulada hasta ahora es:

$$(57) p = 10^{-145} * 10^{-2} * 10^{-2} = 10^{-149} .$$

Ahora, falta fijar los rangos en que estas fuerzas operan. En el caso de la fuerza electromagnética y gravitacional se trata del radio del Universo entero. En el caso de la fuerza nuclear débil y la fuerza nuclear fuerte, se trata del radio de un núcleo. La razón del radio del Universo y del radio del núcleo es, más o menos 10^{40} , de modo que la precisión acumulada del ajuste fino, debe de ser, según Smolin:

$$(58) p = 10^{-149} * 10^{-40} * 10^{-40} = 10^{-229};$$

Comenta Smolin: “Llegamos a la conclusión de que la probabilidad de que nuestro mundo resultara ser como el nuestro, con estrellas que duran miles de millones de años y, en consecuencia, con física nuclear y atómica más o menos como la nuestra, en el supuesto de que los parámetros del modelo estándar se elijan al azar, es cuando mucho una parte en 10^{229} .”¹⁰⁵²

¹⁰⁴⁸ Definición de B. Carr & Martin Rees, *Nature*, vol. 278 (Abril de 1979): 611. Los portadores de la fuerza nuclear débil son los bosones W^+ , W^- , Z_0 con $m > 80 GeV$ y $spin=1$

¹⁰⁴⁹ El 0.1% del diámetro de un protón

¹⁰⁵⁰ Definición de Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 21. La diferencia con Carr & Rees se explica por la diferencia en masa del electrón y protón: $10^{-11} * (1/\beta)^2 = 3.37 * 10^{-5} \cong 10^{-5}$

¹⁰⁵¹ Lee Smolin, “Taking the strong nuclear interaction as the measure, the weak and electromagnetic interaction are each about one part in 100”, en: *The Life of the Cosmos* (1998): 325

¹⁰⁵² Lee Smolin, *The Life of the Cosmos* (1998): 325. Para una estimación más precisa de todas estas constantes, véase el apéndice “Unidades y constantes” de este libro.

Esta estimación de Smolin se puede mejorar un tanto, haciendo algunas precisiones. La probabilidad acumulada de todos estos casos de *fine-tuning* sería, entonces $p \approx 3.75 * 10^{-267}$, como se ve en el siguiente cuadro matemático:

CUADRO MATEMÁTICO 19.8 AFINANDO LAS ESTIMACIONES DE SMOLIN

Podemos afinar un poco las estimaciones de Smolin:

- 1) En primer lugar, sale sobrando la constante cosmológica cuya existencia es dudosa (véase la crítica detallada en la Sección 15 y la alternativa en la Sección 16) e innecesaria para el *fine-tuning*. Esto reduce la precisión necesaria del *fine-tuning* a $p = 1/10^{169}$.
- 2) Por otro lado, la razón de la fuerza nuclear fuerte y la débil no es $1/10^2$, sino, aproximadamente $1/10^6$, lo que aumenta la precisión del ajuste fino a $p = 10^{-173}$.
- 3) Si la razón del radio del Universo y el radio de un núcleo de tamaño medio es 10^{40} , como estima Smolin, la razón del radio del Universo y del rango de la fuerza nuclear débil es un poco mayor, a saber 10^{43} , porque el rango de la fuerza nuclear débil es un poco menor que el de la fuerza nuclear fuerte.¹⁰⁵³ Esto aumenta la probabilidad total del ajuste fino a $p = 10^{-176}$.
- 4) Por otro lado, si bien es cierto que Smolin fija el valor de la fuerza gravitacional, no fija *la razón de la fuerza gravitacional y la fuerza nuclear fuerte*, que es $1/6 * 10^{39}$. Esto da un *fine-tuning* acumulado de $p \approx (1/6) * 10^{-215}$.
- 5) Smolin no toma en cuenta el *fine-tuning* del impulso (la energía cinética) de la expansión inicial del *Big Bang*, que Rees estima en $1/10^{15}$. Esto eleva el grado de *fine-tuning* acumulado a $1/6 * 10^{-230}$.
- 6) También hemos de tomar en cuenta el número de dimensiones espaciales necesarias para órbitas planetarias cerradas y estables. Con respecto al posible número máximo de dimensiones espaciales, realmente no hay límite, pero tomaré el número 11 que se maneja en algunas teorías de supercuerdas, es decir, la probabilidad de que salgan tres dimensiones espaciales es $p = 1/11 = 0.091$. Esto eleva el grado de *fine-tuning* a $p = 0.015 * 10^{-230}$.
- 7) Hemos de tomar en cuenta la probabilidad de que el Universo sea suficientemente inmenso para que puedan coincidir, en algún sistema solar, las condiciones iniciales necesarias para la emergencia de vida compleja. Aquí solamente hay dos posibilidades, a saber, que el tamaño del Universo SÍ es o que NO es suficientemente grande para que emerja vida compleja, es decir, $p = 0.5$. La probabilidad acumulada de todos estos casos de *fine-tuning* es $p = 0.75 * 10^{-232}$.
- 8) Smolin no estima la masa del neutrino, ni toma en cuenta el *fine-tuning* de la masa del neutrino, pensando, posiblemente, que da lo mismo si esta masa es cero, o casi cero. La masa del neutrino es $5 * 10^{-35}$ kg. Davies señala que un neutrino ligeramente más masivo, llevaría un colapso temprano del Universo y, además, “una severa ruptura de la estructura de las galaxias”.¹⁰⁵⁴ Por otro lado, un neutrino menos masivo, habría llevado a una expansión acelerada del Universo, impidiendo la formación de estrellas y galaxias, porque, aunque el neutrino tiene muy poca masa,

¹⁰⁵³ En el caso de la fuerza nuclear débil se trata de 10^{-18} metros, que es el 0.1% del diámetro de un protón; en el caso de la fuerza nuclear fuerte, se trata de 10^{-15} metros, que es el radio de un núcleo mediano. Véase el Apéndice IX con unidades y constantes.

¹⁰⁵⁴ Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 62

su densidad es muy grande ($N_v = 10^9 / m^3$), lo que implica que “la masa acumulada de los neutrinos en el Universo pesa más que todas las estrellas”.¹⁰⁵⁵

También las supernovas imponen límites a la masa del neutrino. Aunque las estrellas son transparentes para los neutrinos, la implosión que precede la supernova, es tan poderosa y comprime a tal grado el interior de la estrella, que éste frena apreciablemente el paso de los neutrinos los cuales luego generan la presión necesaria para la explosión de la periferia. De esta manera se diseminan en el espacio los elementos pesados fusionados en la estrella previamente a la supernova. Así, el carbono, oxígeno y fierro en nuestro sistema solar fueron esparcidos al espacio por una supernova que dio vida al Sol y los planetas. Por lo tanto, “sin supernovas planetas como nuestra Tierra no existirían”.¹⁰⁵⁶ Si el neutrino realmente tuviera masa cero, no tendría esta capacidad de presión. Si fuera más masivo, llegaría a formar parte del agujero negro que queda cuando una estrella termina su vida con una implosión.

En algunos casos se pueden permitir ciertas variaciones mínimas de las constantes y condiciones iniciales, sin que éstas afecten la probabilidad de la emergencia de estrellas y vida, pero, la variación permitida de una constante limita la variación permitida de otra, de modo que el margen de error permitido en el *fine-tuning* difícilmente rebase el 10%. Esto nos da un margen estrecho para el *fine-tuning* acumulado del Universo en función de la emergencia de estrellas de larga duración, fusión de elementos pesados y vida compleja:

$$(59) \quad p \approx 3.375 * 10^{-267} < \text{finetuning} < p \approx 4.125 * 10^{-267}$$

SECCIÓN 20. LAS TEORÍAS MODERNAS DEL MULTIVERSO

Ante el hecho innegable del *fine-tuning*, muchos cosmólogos optan por un conjunto de teorías que tienen como denominador común el llamado *multiverso*, que postula un mecanismo de multiplicación ilimitada de Universos y de variación de leyes y constantes físicas en estos Universos, de modo que la probabilidad de que emerjan Universos con leyes y constantes y condiciones iniciales propicias para la emergencia de vida compleja sea cercana a la unidad. Estas teorías del multiverso se pueden agrupar en *seis grupos* de teorías.

1. La teoría de Hoyle de los *campos creacionales* en el Universo observable;
2. La teoría del *Big Crunch* de Wheeler;
3. La teoría de la *variación de las constantes* de Barrow y otros;
4. La teoría del *multiverso en agujeros negros* de Smolin;
5. La teoría-ficción de la *eterna inflación* de Guth-Linde;
6. La teoría-ficción del multiverso de Susskind;
7. Conclusión sobre las teorías del multiverso.

¹⁰⁵⁵ Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 61

¹⁰⁵⁶ Paul Davies, *The Accidental Universe* (1983): 68

Veremos un representante de cada grupo, a saber, la teoría de Hoyle (I), Wheeler (II), Barrow (III), Smolin (IV), Guth-Linde (V) y Susskind (VI).

Sección 20.1. La teoría de Hoyle de los campos creacionales en el Universo observable

El primer grupo de teorías, contempla variaciones de las leyes naturales y sus constantes en diferentes regiones espacio-temporales de nuestro propio Universo, pero no solamente esto. Contempla, además, que en nuestro Universo se crea continuamente nueva materia-energía. Todo empezó con que Hoyle quedó muy desconcertado al ver el ajuste tan fino de las constantes de la fuerza electromagnética y la nuclear fuerte que permite la fusión nuclear de carbono y oxígeno en cantidades adecuadas para la vida: *“No creo que un científico que ha examinado la evidencia podría dejar de concluir que las leyes de la física nuclear han sido diseñadas deliberadamente con respecto a las consecuencias que producen dentro de las estrellas. Si esto es así, entonces mis pesquisas han revelado un plan oculto en las profundidades. Si no es así, estamos ante una secuencia increíble de casualidades.”*¹⁰⁵⁷

Dado que todo lo que huele a un diseño deliberado de un dios creador, era absolutamente inaceptable para Hoyle, acudió a la teoría de los campos creacionales generadores de nueva materia-energía y de variación de las constantes de las leyes físicas:

*“El ajuste tan curioso de los niveles [de masa atómica] tan curiosos de carbono y oxígeno, ya no requiere de la aparición de accidentes asombrosos. Podría ser, simplemente, que criaturas como nosotros, que dependemos de un balance entre carbono y oxígeno, solamente podamos existir en estas porciones del Universo donde estos niveles han sido alcanzados por casualidad. En otros lugares ... la adición de partículas alpha a C12 podría ser muy resonante. En estos lugares ... criaturas como nosotros no existirían.”*¹⁰⁵⁸

La teoría del *Steady State* contempla un Universo eterno donde continuamente se crean nuevas regiones espacio-temporales en los famosos ‘campos creacionales’, cuya existencia conjeturó Hoyle sin aportar prueba empírica alguna, y este enunciado es lógicamente compatible con el otro, de la variación de los constantes de las leyes naturales en diferentes regiones espacial-temporales. La crítica puede ser breve. La teoría del *Steady State* ha sido refutada por el descubrimiento de los cuasares y de la Radiación Cómica de Fondo CMBR, como vimos en la Sección 18.2.

Sección 20.2. La teoría del *Big Crunch* de Wheeler

El segundo grupo de teorías (II) contempla una variación de las constantes de las leyes físicas en el tiempo. Se supone la existencia de una eterna sucesión de *Big Bangs* y *Big Crunches*, y dado que en cada *Big Bang* las leyes naturales y las constantes son fijadas de nuevo, en forma diferente del anterior Universo, algún día, por la ley de los números grandes, tuvo que surgir, por casualidad, nuestro Universo tan especialmente ajustado para la evolución de estrellas y vida. En 1973, John Wheeler, un físico americano nacido en 1911, publicó un ensayo titulado *From Relativity to Mutability*.¹⁰⁵⁹

¹⁰⁵⁷ Citado en John Barrow, *Constants of Nature* (2002): 157

¹⁰⁵⁸ Citado en John Barrow, *Constants of Nature* (2002): 156. Sobre el proceso triple-alpha, véase la Sección 17.2

¹⁰⁵⁹ John Wheeler, “From relativity to mutability,” en: Jagdish Mehra ed., *The Physicist’s Conception of Nature* (1973): 202-247

Wheeler parte de algunos supuestos para formular su teoría de la eterna sucesión de *Big Bangs* y *Big Crunches*. Supone que nuestro Universo es cerrado ($k > 0$), de modo que el colapso final es inevitable y que al final de la historia de cada Universo está un agujero negro supermasivo. Supone también que cada colapso ‘revierte’ en un *Big Bang*, en donde un nuevo Universo nace del agujero negro anterior. Supone, por fin, que en cada colapso, todo queda aniquilado, no solamente materia y energía, sino también el espacio-tiempo y, en consecuencia, todas las leyes físicas con sus constantes. Supone, además, que cuando el ave fénix resurge de las cenizas, el nuevo Universo tiene leyes naturales diferentes del anterior. Este fenómeno es lo que Wheeler llama *mutability*, es decir, ‘cambiabilidad’. *Hay un supuesto más, del cual el mismo Wheeler no es consciente. Vale la pena citar a Wheeler, precisamente para descubrir este supuesto inconsciente: “Si la ley de conservación del número de partículas es transcendido en un agujero negro (a); si todas las leyes naturales son transcendidas en el colapso del Universo (b); si las leyes naturales y los constantes de la física son ‘impresas’ como condiciones iniciales en la fase más temprana del Big Bang (c); y son aniquiladas en la etapa final del colapso gravitacional (b); entonces la dimensionalidad [=la forma de estas leyes] no podrá estar exenta de la ‘cambiabilidad’ universal.”*¹⁰⁶⁰

Invito al lector a fijarse en este razonamiento de Wheeler. Todas las condiciones son ciertas, tanto (a), y (b) como (c). Sin embargo, la conclusión es falsa, porque hay un supuesto adicional, del cual Wheeler no parece ser muy consciente. Él *supone que nuestro Universo empezó como un agujero negro que explotó y este supuesto es falso*. Muchos cosmólogos hablan de la ‘singularidad’ al inicio del *Big Bang*. Una singularidad es el núcleo de un agujero negro, donde todo el espacio-tiempo y toda la materia-energía han colapsado. Sin embargo, esta condición no se cumple. Nuestro Universo empezó en un estado de organización y complejidad excepcionalmente altas, todo lo contrario del estado de un agujero negro supermasivo.

Un segundo punto de crítica es que Wheeler hace referencia a *una teoría no existente* para explicar los acontecimientos, a saber, *la teoría que explicaría cómo la singularidad espacio-temporal que resulta del Big Crunch explota en un tipo de ‘rebote’ (bounce) y que, además, explicaría cómo las constantes físicas fundamentales cambian en este rebote*. Recuerde el lector que la ciencia presenta teorías refutables. Una teoría no existente es, por definición, no refutable y, por lo tanto, no es científica, como explico en la parte metafísica de este libro (véase la Sección 21). Un tercer punto de crítica es que toda la evidencia hoy disponible indica que nuestro Universo no es cerrado, sino abierto o plano, de modo que no se colapsará jamás, sino que se expandirá para siempre.

Sección 20.3. La teoría de la variación de las constantes de Barrow

John Barrow¹⁰⁶¹ y otros autores han hecho la propuesta de que las constantes principales de las leyes físicas no solamente varían de un Universo a otro sino aún, con el tiempo, en nuestro propio Universo. Esta hipótesis es ciertamente científica, porque es refutable por los hechos. En esta sección confrontaremos esta hipótesis con la realidad, para ver si es cierta o falsa.

¹⁰⁶⁰ John Wheeler, en Jagdish Mehra ed., *The Physicist’s Conception of Nature* (1973): 241, la numeración de las condiciones es mía

¹⁰⁶¹ John Barrow & Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (1986): 255-257; John Barrow, *The Constants of Nature* (2002): 259-268; John Barrow & John Webb, “Inconstant Constants”, en: *Scientific American*, vol. 16 (2006): 72-81

En 1972, Freeman Dyson aportó evidencia inequívoca de que en todas las regiones espacio-temporales del Universo observable, la hipótesis de la variabilidad de los constantes de las leyes naturales es falsa.¹⁰⁶² Dijo Dyson, a manera de conclusión de su investigación:

*“De las hipótesis [que contemplan un cambio de los constantes fundamentales], las dos que implican una variación en el tiempo de la constante de estructura fina (fine structure constant) son refutadas por la observación [empírica]. (...) De las dos hipótesis que postulan una variación en el tiempo de la constante gravitacional (...), la de Dirac es apenas compatible con la evidencia de la evolución del Sol y las estrellas y será puesta a prueba de modo decisivo por mediciones de distancias interplanetarias en los siguientes pocos años. Quedan únicamente la hipótesis C, de Dicke, que conjetura una variación de la gravedad mucho menor en el tiempo que la de Dirac, y la hipótesis ortodoxa A que postula que todas las constantes medidas en laboratorio son realmente constantes. Una decisión entre [estas dos últimas hipótesis] A y C no está dentro de nuestra capacidad de observación actual [1972]. Probablemente se llegue a una decisión, indirectamente, por observaciones.... en los diez años que vienen.”*¹⁰⁶³

Otro tanto afirmaba, en aquel entonces, Wheeler: “Ningún cambio en el paso del tiempo se ha encontrado jamás en la constante de la estructura fina [que determina la fuerza electromagnética], en la masa de cualquier partícula, o en cualquier otra constante de la física.”¹⁰⁶⁴ En este mismo año, Wheeler y otros discutieron la constancia de la constante gravitacional,¹⁰⁶⁵ y concluyeron que “la constante de Cavendish es constante (will be unity) en la relatividad general, pero en la mayoría de las demás teorías métricas variará de evento a evento en el espacio-tiempo,” según la distribución de la materia en el Universo.¹⁰⁶⁶ Precisamente, la teoría general de la relatividad es la teoría métrica más general que corrobora la hipótesis que las leyes de la física y sus constantes son invariantes e independientes del sistema de coordenadas. Otros trabajos, más recientes, si bien ofrecen teorías que permiten una dinámica de variación de las constantes, confirman a la vez la invarianza de estas constantes en nuestro Universo observable.¹⁰⁶⁷

Particularmente relevante resulta una síntesis reciente, de 2003, de Jean-Philippe Uzan.¹⁰⁶⁸ Él pone a prueba la hipótesis sobre la variación de algunas constantes fundamentales, entre ellas, la *fine-structure constant* α , la constante gravitacional de Newton G , y el ratio β de la masa del electrón y del protón. Uzan no saca el promedio de los resultados de múltiples estudios hechos sobre la

¹⁰⁶² Freeman Dyson, “The Fundamental Constants and Their Time Variation”, en: Abdus Salam & E. Wigner, eds., *Aspects of Quantum Theory* (1972):235-236

¹⁰⁶³ Freeman Dyson “The Fundamental Constants and Their Time Variation”, en: Abdus Salam & E. Wigner, eds., *Aspects of Quantum Theory* (1972): 235-236).

¹⁰⁶⁴ John Wheeler, “From relativity to mutability,” en: J. Mehra, *The Physicist’s Conception of Nature* (1973): 202-247

¹⁰⁶⁵ Charles Misner, Kip Thorne & John Wheeler, “Is the gravitational constant constant?”, en: *Gravitation* (1973): 1121-1126

¹⁰⁶⁶ Charles Misner, Kip Thorne & John Wheeler, “Is the gravitational constant constant?”, en: *Gravitation* (1973): 1122

¹⁰⁶⁷ Jean-Philippe Uzan, “The fundamental constants and their variation: observational and theoretical status”, en: *Reviews of Modern Physics* (2003): 403-455; y Wendy Freedman & Michael Turner, en: *Reviews of Modern Physics* (2003): 1433-1447

¹⁰⁶⁸ Jean-Philippe Uzan, “The fundamental constants and their variation: observational and theoretical status”, en: *Reviews of Modern Physics*, vol. 75 (2003):403-455

hipotética variación de una misma constante adimensional. Sin embargo, sus datos permiten sacar estos promedios para tres constantes, a saber, el fine-structure constant α , la constante gravitacional G , y la razón de las masas del electrón y el protón β . Al calcular estos promedios, podemos poner a prueba la hipótesis sobre la variación de las constantes de la naturaleza en el tiempo o el espacio. A continuación presento el resultado de este análisis.

EL FINE-STRUCTURE CONSTANT α . Con respecto a la variación del *fine-structure constant*, $\Delta\alpha_{EM}/\alpha_{EM}$, Uzan presenta los resultados de 16 estudios que miden su posible variación en el tiempo. De estos estudios, 12 indican variación cero; dos, variación negativa y dos, variación positiva. En todos los casos, los datos se presentan respetando un margen de error.

CUADRO MATEMÁTICO 20.1 LA VARIACIÓN DE LA CONSTANTE DE ESTRUCTURA FINA

Al estandarizar estos datos de Uzan, con el programa *Mathematica* de Wolfram, para un lapso de mil millones de años, y calculando el promedio de estos 16 estudios, obtengo el siguiente resultado:

$$(1) +0.0278\% > \frac{\Delta\alpha_{EM}}{\alpha_{EM}} > -0.0278\%$$

La conclusión ineludible es que *la hipótesis sobre la variación del fine-structure constant queda refutada*, dado que su variación en 10^9 años, en nuestro Universo, es cero, con un margen de error de $\pm 0.0278\%$, lo que para fines prácticos significa cero.

LA CONSTANTE GRAVITACIONAL G . La primera persona que sugirió que la constante gravitacional podría haber cambiado con el tiempo, fue Dirac. Después otros le siguieron.¹⁰⁶⁹ Pondremos a prueba la hipótesis sobre la variación de la constante gravitacional G de Newton. Uzan sintetiza 32 estudios que pretenden medir la variación de esta constante en el tiempo.

CUADRO MATEMÁTICO 20.2 LA VARIACIÓN DE LA CONSTANTE GRAVITACIONAL

Estandarizando, otra vez, el plazo del cambio, a 10^9 años, y calculando el promedio de los resultados de 323 estudios empíricos, obtengo el siguiente resultado sobre la posible variación de la constante gravitacional:

$$(2) +3.42\% > \Delta G/G > -3.34\%$$

¹⁰⁶⁹ Paul Dirac, "The cosmical constants", en: *Nature*, vol.139 (1937): 323. Véase Malcolm Longair, *The Cosmic Century* (2006): 323

La evidencia empírica refuta la hipótesis sobre la variación de la constante gravitacional,¹⁰⁷⁰ como dice Davies: *“El enunciado que G es una constante universal implica que, si uno midiera la fuerza de atracción entre dos masas de un kilogramo a una distancia de un metro, en el lugar que sea del Universo y en el momento que sea de su historia, el resultado siempre sería $6.7 * 10^{-11} N$.”*¹⁰⁷¹

LA RAZÓN DE LAS MASAS DEL ELECTRÓN Y DEL PROTÓN β . Veamos ahora la hipótesis sobre la posible variación de β , es decir, de la razón entre la masa del electrón y del protón. En el siguiente cuadro matemático se comprueba que, dado el rango mínimo de variación de β , *queda refutada la hipótesis sobre la variación de la constante β .*

CUADRO MATEMÁTICO 20.3 LA RAZÓN DE LAS MASAS DEL ELECTRÓN Y DEL PROTÓN

Nueve de los 10 estudios sintetizados por Uzan, no proporcionan directamente el dato del lapso de tiempo de la posible variación de esta constante, sino datos sobre el corrimiento al rojo, a raíz de la expansión del Universo, de los objetos estudiados. Kolb & Turner nos ofrecen una ecuación para transformar el factor z del corrimiento al rojo en el factor tiempo t :¹⁰⁷²

$$(3) t = 2.0571 * 10^{17} (\Omega_0 h^2)^{-1/2} (1+z)^{-3/2} s \quad (\Omega_0 = 1; h = 6.626 * 10^{-34})$$

Aplicando esta ecuación a los diferentes valores de z en los nueve estudios con datos sobre z , referidos por Uzan, obtengo el siguiente rango promedio de la posible variación de β en 10^9 años:

$$(4) 3.934\% > \beta > -3.935\%$$

La conclusión es que no existe evidencia empírica que corrobore la hipótesis sobre la variación de las constantes en nuestro Universo observable y, al contrario, existe evidencia abrumadora que la refuta. Es importante señalar, que la teoría de la invarianza de las constantes de las leyes físicas en el espacio-tiempo, NO implica una postura metafísica de causalidad determinista. La discusión sobre la causalidad determinista o indeterminista se lleva a cabo en otra parte de este libro,¹⁰⁷³ y aquí me limito a reproducir la conclusión de esta discusión, en las palabras de Popper:

*“Podemos admitir que el mundo no cambia en la medida que permanezcan invariantes ciertas leyes universales: pero existen otros aspectos parecidos a leyes, importantes e interesantes —especialmente las propensiones probabilísticas— que cambian dependiendo del cambio de la situación. Por lo tanto (...) puede haber leyes invariantes y emergencia [de cosas nuevas e impredecibles], ya que el sistema de leyes invariantes no es lo bastante completo y restrictivo para evitar la emergencia de nuevas propiedades semejantes a leyes.”*¹⁰⁷⁴

¹⁰⁷⁰ En el modelo relativista de Brownstein y Moffat, se redefine la constante gravitacional, como una variable. No se trata de una variación de la constante gravitacional newtoniana con el tiempo. Véase el Cuadro Matemático 14.8.

¹⁰⁷¹ Paul Davies, *The Accidental Universe* (1984): 10

¹⁰⁷² Ecuación de Edward Kolb & Michael Turner, *The Early Universe* (1990): 504

¹⁰⁷³ Véase la Sección 22 de este libro

¹⁰⁷⁴ Karl Popper, *El Yo y su Cerebro* (1985): 28; *Self and Its Brain* (1981): 25

Sección 20.4. La teoría del multiverso en agujeros negros de Smolin

Lee Smolin presenta una teoría del multiverso¹⁰⁷⁵, en la cual los Universos están esparcidos no en el tiempo, sino en el espacio. Cada Universo tiene diferentes leyes naturales y constantes. Smolin, al igual que Wheeler, afirma que nuestro Universo nació de un agujero negro supermasivo que rebotó y explotó (el *Big Bang*), y que este agujero negro resultó del colapso de un Universo anterior. En síntesis, “*la pregunta de qué pasó antes del Big Bang en el caso de que efectos cuánticos permitan que el tiempo se extienda indefinidamente en el pasado*” recibe la respuesta que antes hubo otro Universo que colapsó en un agujero negro, y, en general, “*lo que se encuentra más allá del horizonte de eventos de un agujero negro es el inicio de otro Universo.*”¹⁰⁷⁶ Este planteamiento implica que no hubo un punto $t = 0$, es decir, el multiverso es eterno. A diferencia de Wheeler, Smolin conjetura que esto pasa con *todos* los agujeros negros, también los actualmente existentes en nuestro Universo, por ejemplo, en el centro de las galaxias, y no solamente con el agujero negro supermasivo que resulte del colapso de un Universo entero, de modo que “*vivimos en una comunidad, en crecimiento continuo, de ‘Universos’, cada uno de los cuales nació de una explosión que siguió el colapso de una estrella en un agujero negro.*”¹⁰⁷⁷

La crítica a la teoría de Smolin es en parte la misma que hice a la teoría de Wheeler, a saber, que nadie conoce la teoría física que explica cómo explotan los agujeros negros ni cómo cambian las leyes físicas y sus constantes en los *Big Bangs* que resultan de estas explosiones. Pero, hay una crítica adicional. Al postular Smolin que desde fuera no podemos ver lo que pasa dentro de un agujero negro, su teoría corre el peligro de volverse irrefutable. Sin embargo, Smolin se dice partidario de la lógica de la investigación científica de Popper¹⁰⁷⁸ y es muy consciente de este peligro. Él sostiene que su teoría de la selección natural de Universos a favor de Universos con más agujeros negros es *indirectamente* falseable. Según la teoría de Smolin, la gran cantidad de agujeros negros en nuestro Universo es indicio de que sacamos el boleto de la buena suerte, es decir, un Universo que permite estrellas y vida. Smolin establece una correlación entre abundancia de agujeros negros y el ajuste fino de las constantes de las leyes físicas en función de la emergencia de estrellas de larga duración y vida compleja en algunos sistemas solares. Las constantes de las leyes físicas de nuestro Universo favorecieron la producción de abundante oxígeno y carbono y también de abundantes agujeros negros.

Aunque Smolin acepta la refutabilidad como criterio de demarcación entre ciencia y no-ciencia, *no queda claro que su teoría sea refutable, porque el único Universo observable es el nuestro y ¿con qué criterio se afirma que en el nuestro hay relativamente muchos o pocos agujeros negros? Es una cuestión relativa y la no-observabilidad de todos los demás Universos, impide toda comparación.*

Otro punto de crítica es de orden físico, porque, según Livio, no es cierto que las constantes de nuestro Universo favorezcan la producción de agujeros negros. “*Una reducción en la eficiencia de los procesos de fusión nuclear [por un cambio en las constantes, JA], resultaría en una mayor cantidad de estrellas incapaces de resistir el jalón final de la gravedad, y transformadas en agujeros negros.*”¹⁰⁷⁹

¹⁰⁷⁵ Lee Smolin, *The Life of the Cosmos* (1997)

¹⁰⁷⁶ Lee Smolin, *The Life of the Cosmos* (1997): 87-88

¹⁰⁷⁷ Lee Smolin, *The Life of the Cosmos* (1997): 88

¹⁰⁷⁸ Lee Smolin, *The Life of the Cosmos* (1997): 76-77

¹⁰⁷⁹ Mario Livio, *The Accelerating Universe* (2000): 188-189, mi subrayado

Para terminar la crítica a las teorías de Wheeler y Smolin doy la palabra a Penrose:

*“Las propuestas de Wheeler y Smolin me causan mucho problema. En primer lugar, consta la naturaleza extremadamente especulativa de la idea central de que un proceso físico actualmente desconocido no solamente es capaz de revertir la singularidad espacio-temporal del colapso [gravitacional] en un ‘rebote’, pero, además, de reajustar levemente las constantes físicas fundamentales. No conozco justificación alguna de la física conocida para sugerir tal extrapolación. Pero, en mi opinión, es aún más inverosímil, geoméricamente, que las altamente irregulares singularidades que resultan de este colapso puedan, por arte de magia, convertirse en el Big Bang extraordinariamente regular y uniforme que cualquier Universo necesitaría [para obtener el fine-tuning y la estructura ordenada del Universo] como la conocemos.”*¹⁰⁸⁰

Sección 20.5. La teoría-ficción de la eterna inflación de Guth-Linde

La teoría de la inflación eterna de Linde presupone la teoría de la inflación de Alan Guth. Por la popularidad que tiene la teoría de la inflación de Guth¹⁰⁸¹ en la comunidad académica, haré, a continuación, una breve síntesis de ella.

QUÉ ES INFLACIÓN. Según Guth, la ‘inflación’ es una expansión geométrica acelerada —mucho más rápida que la velocidad de la luz— del Universo durante una fracción de su primer segundo de vida, lo que resultó, según Allday, al terminar el período de la inflación, en un Universo *entero* con un diámetro, en aquel entonces, de 10^{19} años luz y un Universo *observable* con un diámetro, en aquel entonces, de 3 metros y hoy $14.9 \cdot 10^9$ años luz.¹⁰⁸²

INFLACIÓN Y HOMOGENEIDAD. Después de esta inflación muchas regiones del Universo no volvieron a estar en contacto unas con otras. Pero, de todos modos son homogéneas, porque *antes* de la inflación *sí* intercambiaron energía y nivelaron diferencias entre niveles de energía y temperatura de diferentes regiones del Universo, por medio del intercambio de fotones y electrones, lo que explicaría *la homogeneidad de la radiación cósmica de fondo* aún después de la inflación y, en general, el problema del horizonte.¹⁰⁸³

INFLACIÓN Y FLATNESS. Según Guth, la inflación explica también el *flatness* del Universo. Lo que entusiasmó a Guth era precisamente la idea de que “*esta clase de súper-enfriamiento [e inflación] puede explicar por qué el Universo hoy día es tan plano [‘flat’: $k=0$].*”¹⁰⁸⁴

¹⁰⁸⁰ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 761-762

¹⁰⁸¹ Alan Guth, *The Inflationary Universe* (1998)

¹⁰⁸² Jonathan Allday, *Quarks, Leptons and the Big Bang* (2002): 256, 334-336

¹⁰⁸³ Robert Kirshner, *The Extravagant Universe* (2002):117; George Smoot & Keay Davidson, *Wrinkles in Time* (1993):150-151, 176-184; Alan Guth, *The Inflationary Universe* (1998):180-186; Jonathan Allday *Quarks, Leptons and the Big Bang* (2002): 334-343

¹⁰⁸⁴ Alan Guth, *The Inflationary Universe* (1998): 179

BOSONES HIGGS E INFLACIÓN. Guth explica la expansión geométrica acelerada del Universo, en esta fracción del primer segundo del Universo, por una gravitación repulsiva resultante de los bosones Higgs que se generan en el falso vacío. Esto es toda una boca llena de cosas inusuales y bizarras y voy a tratar de explicar el pensamiento de Guth, paso por paso. El enunciado sobre esta relación causal entre bosones Higgs e inflación es el núcleo de lo que comúnmente se conoce como ‘la teoría de la inflación’. Según Guth, el bosón Higgs crea un ‘vacío falso’ (*false vacuum*), que en el *Big Bang* tuvo una densidad de materia-energía equivalente a 10^{80} gramos por centímetro cúbico. El vacío se llama ‘falso’, porque tiene la característica de tener una densidad de energía constante. Si uno jala el pistón de un cilindro con gas, según Boyle, sucede que, al aumentar el volumen V disminuye la presión P o densidad del gas. Esta operación cuesta energía U . En el Universo en expansión inflacionaria, el volumen V se expande ($\Delta V > 0$), y dado que $\Delta U = -P \Delta V$, en el vacío falso, la presión P debe ser negativa ($P > 0$) para que aumente la energía ($\Delta U > 0$). En el vacío falso en expansión, lo que es constante no es el producto de densidad y volumen, sino la densidad P , de modo que, al ‘jalar el pistón’ y aumentar el volumen, aumente la energía ($\Delta U > 0$) y, en consecuencia, *queda igual la densidad de energía o presión* ($\Delta U \propto \Delta V \Rightarrow \Delta P = \Delta(U/V) = 0$).

Normalmente, cuando hay un cilindro con gas que ejerce presión sobre el pistón, esta presión ayuda al pistón a que se mueva de manera que incremente el volumen y disminuya la presión. Pero, aquí es al revés: la presión, según Guth, es negativa, de modo que la expansión del volumen requiere y no libera grandes cantidades de energía. ¿De dónde vino esta energía para alimentar esta expansión en el primer segundo del *Big Bang*? Según Guth, se derivó de la fuerza gravitacional. En esta fracción de segundo de la época de inflación, la fuerza gravitacional, en lugar de ser atractiva (causando una condensación del espacio-tiempo y de la materia-energía) fue repulsiva: “*el falso vacío lleva a una repulsión gravitacional fuerte,*”¹⁰⁸⁵ es decir, un campo/partícula Higgs generó la presión negativa del ‘falso vacío’ y ésta, la repulsión gravitacional.

No es que Guth haya descubierto el campo/partícula Higgs. El descubrimiento teórico es de Peter Higgs, de Edinburgo. Ni siquiera es la misma partícula postulada por Higgs,¹⁰⁸⁶ porque ésta tiene que ver con el rompimiento de la simetría de la fuerza electrodébil, a muy altas temperaturas, de unos 10^{14} GeV y la partícula Higgs de Guth tiene otras características muy diferentes. Ni la partícula Higgs de Higgs, ni la partícula Higgs de Guth, jamás han sido detectadas. El *Particle Data Group* las registra como ‘buscadas’ sin ser halladas.¹⁰⁸⁷ En el verano de 2008, el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, cerca de Ginebra, que permite el choque de protones con casi la velocidad de la luz, empezó a buscar bosones Higgs sin encontrarlos, luego se descompuso y probablemente vuelva a funcionar en el año 2010.

Si al lector le parece que esta teoría de Guth es inusual y bizarra, Guth está de acuerdo: “*la noción inusual de material con una densidad de energía constante nos ha llevado a la noción bizarra de una presión negativa*”¹⁰⁸⁸

¹⁰⁸⁵ Alan Guth, *The Inflationary Universe* (1998): 173, mi subrayado

¹⁰⁸⁶ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 751

¹⁰⁸⁷ Particle Data Group, 2006, “Review of Particle Physics,” en: *Journal of Physics G. Nuclear and Particle Physics*, Vol. 33 (julio de 2006):32

¹⁰⁸⁸ Alan Guth, *The Inflationary Universe* (1998): 172, mi subrayado

CRÍTICA DE LA TEORÍA DE LA INFLACIÓN. Muchos autores critican la relación que Guth establece entre esta expansión geométrica acelerada y el *bosón Higgs*, entre otros, Hawley y Holcomb¹⁰⁸⁹. Penrose la critica como un caso de ciencia ficción: “Para lograr una época inflacionaria, es necesario introducir un nuevo campo escalar ϕ en el zoológico de las partículas/campos físicos conocidos (y conjeturados). En cuanto yo sepa, ese campo ϕ no tiene relación alguna con otro campo de la física, y es introducido únicamente con el fin de obtener una fase inflacionaria en el Universo temprano.”¹⁰⁹⁰ Al no encontrar el hipotético bosón Higgs para explicar la hipotética inflación en el Universo temprano, los nuevos teóricos de la inflación, entre ellos Linde, inventaron otra partícula, el *inflatón*, para que jugara este papel. Este modo de proceder de inventar un objeto físico inusual y bizarro para salvar una teoría con otro objeto físico inusual y bizarro ya refutada, es ciencia ficción.¹⁰⁹¹

El *verificacionismo es rampante en las teorías de la inflación*, como señala Penrose en su crítica a esta teoría.¹⁰⁹² Primero, Guth conjeturó que la ‘inflación’ explicaba el *flatness* del Universo ($k = 0$), porque cualquier irregularidad geométrica que pudiera haber existido antes de la inflación, habría sido ‘estirada’ y, por eso, ‘planchada’ hasta el punto de desaparecer, después de la inflación. El supuesto que irregularidades geométricas se ‘planchan’ y desaparecen en una expansión a escala grande contiene, según Penrose, “un error fundamental,”¹⁰⁹³ porque, por ejemplo, conjuntos fractales nunca se ‘planchan’, por más que se los estira.

Después hubo una época en la cosmología, cuando era popular la propuesta de Hawking y Turok de un Universo cerrado ($k = +1$) sin fronteras, y los inflacionistas adaptaron su modelo a un Universo cerrado. Ahora de repente, la inflación explicaba que el Universo no era plano, sino cerrado.¹⁰⁹⁴ Esta manera de ‘adaptar’ una teoría a la evidencia que (aparentemente) la refuta, se llama *verificacionismo*. Posteriormente, Hawking modificó su teoría, ante la evidencia creciente de un Universo abierto ($k = -1$) y también los inflacionistas hicieron otro tanto. Ahora la inflación explicaba el Universo abierto: “En conformidad con esta tendencia en los datos, los teóricos de la inflación empezaron a ofrecer modelos inflacionarios que permiten $k < 0$.”¹⁰⁹⁵ Pero, en 1998, la situación volvió a cambiar, porque surgió nueva evidencia basada en observaciones de supernovas que sugieren una aceleración de la expansión del Universo. Esta supuesta evidencia¹⁰⁹⁶ parecía indicar la existencia de una constante cosmológica mayor que cero ($\lambda > 0$) que podía complementar la falta de materia-energía conocida en el Universo, con el resultado de que $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 0.3 + 0.7 = 1$ y, otra vez, $k = 0$. Comenta Penrose:

“Confrontados con esta nueva evidencia, la mayoría de los teóricos de la inflación han vuelto a $k=0$ como una predicción de la cosmología inflacionaria. No estoy muy seguro ¡qué es lo que Popper habría dicho de todo esto!”¹⁰⁹⁷

¹⁰⁸⁹ John Hawley & Katherine Holcomb, *Foundations of Modern Cosmology* (1998):417-420

¹⁰⁹⁰ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 751

¹⁰⁹¹ Para la definición de ciencia ficción, véase la Sección 21.3

¹⁰⁹² Roger Penrose, 772, 1023

¹⁰⁹³ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 756

¹⁰⁹⁴ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 772

¹⁰⁹⁵ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 1023

¹⁰⁹⁶ Véanse las Secciones 15 y 16

¹⁰⁹⁷ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 1023

Popper habría dicho que se trata de un caso de ‘verificacionismo’. Obviamente, una teoría capaz de explicar $k = 0$, y también $k = -1$, pero también $k = +1$, no es una teoría científica sino una especulación verificacionista: ¡no hay dato empírico que pueda refutarla! porque la teoría se acopla a todos los datos. Según Penrose, la teoría de la inflación no resuelve nada.¹⁰⁹⁸

Según Guth, el campo/partícula Higgs de Guth puede explicar el fenómeno de la inflación del Universo, si le asignamos valores y *características muy especiales*. Por lo tanto, primero postula Guth un fenómeno hipotético (la inflación) que él cree puede explicar la homogeneidad y el *flatness* del Universo, luego explica esta inflación por un campo y una partícula hipotéticas (el campo escalar y el bosón Higgs), cuyo nivel de densidad de energía Guth *ajusta finamente*, sin base empírica ni teórica, precisamente para que pueda explicar la inflación. Estamos hablando de un conjunto de cuatro enunciados, mutuamente consistentes, a saber:

- a) El *bosón Higgs de Guth*, finamente ajustado explica *la energía oscura del vacío* y su fuerza repulsiva.
- b) La *fuerza repulsiva del vacío* explica la *inflación* en el primer segundo del Universo.
- c) La *inflación* explica la *homogeneidad* del Universo
- d) La *inflación* explica el *flatness* del Universo.

Este conjunto de cuatro enunciados, ¿constituye una teoría científica? Veamos. En los enunciados (a) y (b), se pretende que un objeto físico desconocido y nunca observado explica otro objeto físico igualmente desconocido y nunca observado. Desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia, enunciados que explican efectos no observados por causas desconocidas, no pertenecen a la ciencia, sino a la ciencia ficción (véase la Sección 21). Es propio de la ciencia ficción que produce enunciados que no pueden ser contrastadas con la realidad observable. Estoy de acuerdo con lo que afirma Robinson: “No existe ninguna buena razón para creer en una teoría inflacionaria hasta que haga predicciones sobre el Universo que luego puedan ser contrastadas.”¹⁰⁹⁹

En cambio, en los enunciados (c) y (d), se conjetura que una causa física desconocida y nunca observada explica fenómenos observables. En este caso, se trata de especulaciones que son admisibles en la ciencia, como explico en la Sección 21.4, *siempre y cuando se cumplan dos condiciones*:

1. La existencia del efecto ha sido corroborada más allá de una duda razonable. Si el mismo efecto no constara, la hipótesis pertenecería al reino de la ciencia ficción.
2. El efecto observado no puede ser explicado por una causa física conocida y corroborada.

Por lo tanto, *las teorías que establecen relaciones causales entre un objeto físico desconocido y nunca visto, como causa y un efecto observable son especulaciones admisibles en la ciencia, siempre y cuando aceptemos como regla que estas especulaciones sean refutadas cuando logramos explicar los mismos fenómenos observables y observados por causas físicas conocidas y observadas.*

¹⁰⁹⁸ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 746-757, 772, 1020-1024

¹⁰⁹⁹ Michael Robinson, *Los nueve números del Cosmos* (2001): 172

Por lo tanto, el enunciado sobre la relación causal entre la inflación de Guth y la actual homogeneidad del Universo es admisible en ciencia, porque la homogeneidad a gran escala es un hecho, siempre y cuando aceptemos que la hipótesis de la inflación sea rechazada si se encuentra otra explicación de la misma homogeneidad del Universo en términos de fenómenos conocidos y observables. En efecto, pienso que existe otra explicación de una expansión geométrica acelerada del Universo, durante el primer segundo de su evolución, en términos de fenómenos físicos conocidos, a saber, el proceso de transformación de fotones de alta energía en nucleones (véase la Sección 18.4). Por lo tanto, hemos de rechazar el enunciado (c).

Queda el enunciado (d). Como ya vimos en la Sección 16, los datos *actuales* sugieren un Universo abierto cercano a plano, pero las opiniones sobre la geometría del Universo han ido variando con el tiempo. La teoría sobre la relación causal entre inflación y geometría del Universo ha ido cambiando según la popularidad de la especulación de si $k = +1$, ó $k = 0$ ó $k = -1$, en un modo de proceder verificacionista rampante. Esta teoría parte, además, de un supuesto intuitivo erróneo, a saber que irregularidades geométricas que se estiran en una expansión a escala grande siempre se ‘planchan’, cuando esto, de hecho, no es el caso en un Universo aproximadamente fractal.

CONCLUSIÓN. La teoría de la inflación de Guth es, una mezcla de dos enunciados de ciencia ficción (a & b), un enunciado especulativo (c), que es admisible en la ciencia, pero, en este caso, innecesario, dado que existe otra causa del ámbito de la física ortodoxa y no ‘inusual’ y ‘bizarra’ (así caracteriza Guth su propia teoría), y un cuarto enunciado que explica cualquier valor de la constante k , de modo que, por su verificacionismo rampante, no explica nada (d).

No obstante el status poco científico de la teoría de la inflación de Guth, muchos físicos teóricos la aceptan como si fuera un hecho corroborado, como señala Penrose: “*Esta representación [de la inflación al inicio del Universo] debe tomarse como muy especulativa (...), aunque se presenta a menudo como si fuera un hecho establecido.*”¹¹⁰⁰

TEORÍA DE LA ETERNA INFLACIÓN DE GUTH-LINDE. A partir de la teoría de la inflación de Guth, Guth y Linde ampliaron la hipótesis del Universo inflacionario, postulando una inflación eterna,¹¹⁰¹ también conocida como la teoría de la inflación caótica. El vacío falso decae, porque, según Guth, tiene una vida media de unos 10^{-35} segundos. Mientras, en estos 10^{-35} segundos, la mitad del vacío falso decayó, la otra mitad se infló, con una tasa de expansión mucho más rápida que la tasa de decaimiento. Es decir, el volumen de la parte del vacío falso que no decae, se infla hasta alcanzar un volumen mucho mayor que el volumen de la parte del vacío que decae y desaparece. Entonces, no obstante el decaimiento, la región del vacío falso crece: “*la región del vacío falso crecerá para siempre: una vez que empiece la inflación, nunca termina.*”¹¹⁰²

¿Cómo este último enunciado es compatible con la noción de una época de inflación muy breve en nuestro Universo? Guth y Linde contestan que la parte del vacío que decayó, en 10^{-35} segundos,

¹¹⁰⁰ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 752

¹¹⁰¹ Alan Guth, *The Inflationary Universe* (1998): 245-252 ; Andrei Linde, *Inflation and Quantum Cosmology*, (1990): 18-25

¹¹⁰² Alan Guth, *The Inflationary Universe* (1998): 246

es donde sigue el *Big Bang* y nació nuestro Universo. La inflación en la parte que decayó duró muy poco. La otra mitad, que todavía no decayó, se divide en dos partes: una que decae (dando origen a otro Universo) y otra que se infla, para luego dividirse en dos partes: una que se infla, y otra que decae (dando origen a un tercer Universo), etcétera, etcétera. *No solamente es eterna la inflación, sino también la multiplicación de los Universos.*

VARIABILIDAD DE LAS CONSTANTES EN EL MULTIVERSO. Linde introduce en este punto la noción de la “mutación”.¹¹⁰³ Cada Universo tiene sus propias leyes naturales y constantes: “*El Universo se divide en muchos dominios exponencialmente grandes (...). En algunos de estos mini-Universos la física de baja energía [la de tiempos normales] es muy diferente de la nuestra.*”¹¹⁰⁴ Por razones del azar, en algún Universo las leyes y constantes de la física fueron tales que permitieran la evolución de estrellas de larga duración y vida inteligente.

MULTIVERSO Y FINE-TUNING. Este modelo no es más que un refrito del *Steady State* de Hoyle: “*la evolución se parece mucho el viejo modelo Steady State del Universo,*”¹¹⁰⁵ y tiene, para Guth y Linde, el mismo “*atractivo emocional,*”¹¹⁰⁶ al ‘desaparecer’ el misterio del ajuste tan fino de las leyes naturales y constantes en nuestro Universo en función de la vida. Así, Guth siente que se libera de una idea de la “*tradición Judeo-Cristiana,*” inquietante para él, la cual contempla “*el origen del Universo ... como un evento único.*”¹¹⁰⁷ También Linde, en un taller de 1982, asentó que “*no está muy claro cómo podemos concebir la creación del Universo de la nada,*”¹¹⁰⁸ y opta por una regresión infinita, es decir, un multiverso sin inicio en el tiempo, y, en consecuencia, “*ya no parece necesario suponer que realmente haya aparecido algún primer mini-Universo de la nada en algún momento $t = 0$.*”¹¹⁰⁹ De esta manera, Linde “*especuló que podría ser que no exista una creación inicial de qué preocuparse.*”¹¹¹⁰

CRÍTICA DE LA TEORÍA DE LA ETERNA INFLACIÓN. Ahora es tiempo para una crítica de la teoría de la inflación eterna. En primer lugar, el enunciado de Linde sobre un Universo eterno sin punto $t = 0$, ha sido refutado, por Borde y Vilenkin para un Universo que se expande para siempre: “*la conclusión es que la inflación no parece evitar el problema de la singularidad inicial.*”¹¹¹¹ Sí existe, entonces, el punto del tiempo $t = 0$.

En segundo lugar, vimos que la teoría de la eterna inflación es una nueva edición del viejo modelo *Steady State* de Hoyle, Bondi y Gold (véase la Sección 20.1). Ambos modelos pretenden explicar el *fine-tuning* de nuestro Universo, como el fruto de una distribución azarosa de los valores variables de las constantes de las leyes físicas en un número infinito de regiones de nuestro Universo

¹¹⁰³ Andrei Linde, *Inflation and Quantum Cosmology*, (1990): 25-28

¹¹⁰⁴ Andrei Linde, *Inflation and Quantum Cosmology*, (1990): 26, mi subrayado

¹¹⁰⁵ Alan Guth, *The Inflationary Universe* (1998): 248

¹¹⁰⁶ Alan Guth, *The Inflationary Universe* (1998): 248

¹¹⁰⁷ Alan Guth, *The Inflationary Universe* (1998): 251

¹¹⁰⁸ Citado en Helge Kragh, *Conceptions of Cosmos* (2007): 235

¹¹⁰⁹ Andrei Linde, *Inflation and Quantum Cosmology*, (1990): 23

¹¹¹⁰ Helge Kragh, *Conceptions of Cosmos* (2007): 235

¹¹¹¹ Arvind Borde y Alexander Vilenkin, “Eternal Inflation and the Initial Singularity”, en: *Physical Review Letters*, vol. 72 (1994): 3307

(Hoyle, Bondi y Gold) o de un número infinito de Universos (Guth y Linde). La principal diferencia entre el modelo inflacionario y el modelo *Steady State*, es que éste es perfectamente contrastable con las observaciones de nuestro Universo observable, y de hecho fue falseado, y aquel no se puede refutar, porque los demás Universos que se crean continuamente están fuera del alcance de nuestra observación. Guth y Linde han creado una teoría irrefutable, porque no es contrastable con observaciones de la realidad. Ambos admiten esto: “*nunca podremos esperar probar (‘to test’) las predicciones de la inflación [eterna] para regiones que se encuentran más allá de [nuestro] Universo observable.*”¹¹¹² “*No podemos verlos [los demás Universos]...*”¹¹¹³ Sin embargo, una teoría que no es refutable por los hechos, no es una teoría científica, sino ciencia ficción. Parece acertado el juicio de Kragh, de que la teoría de la inflación caótica de Linde “*es uno de varios escenarios cosmológicos de una naturaleza un tanto especulativa y a veces excéntrica.*”

Según Penrose, “[e]xiste un grado extraordinario de precisión en el modo cómo se inició el Universo, en el Big Bang, y esto presenta sin duda un profundo enigma. (...) El punto de vista de los teóricos de la inflación es ... que esencialmente ‘resolvieron’ este enigma con su teoría y esta creencia significa una poderosa motivación detrás de la posición inflacionaria. Sin embargo, a mí me consta que los teóricos de la inflación ni siquiera han planteado seriamente este enigma profundo.”¹¹¹⁴

Sección 20.6. La teoría-ficción del multiverso de Susskind y Kaku

En esta sección, me dejaré llevar de la mano por expertos en la materia, tanto por los que proponen la teoría de la cuerdas y supercuerdas —p.e. Michael Green, Brian Greene, Pierre Ramond, Joël Scherk, John Schwarz, Leonard Susskind, Gabriele Veneziano, Edward Witten y otros—, así como sus críticos —p.e. Richard Feynman, Sheldon Glashow, Gerard ‘t Hooft, y sobre todo, Lee Smolin¹¹¹⁵ y Peter Woit¹¹¹⁶—.

SIMETRÍA BAJO LA VARIACIÓN DE LAS COORDENADAS. Empezamos con la pregunta ¿qué es simetría? Para entender la respuesta, hemos de tomar en cuenta que en la física existen leyes que en situaciones concretas determinan y predicen ciertos resultados. *Si la relación entre causa y efecto, determinada por una ley física, no cambia, en una operación donde sustituyo unos elementos de la situación natural o experimental por otros, decimos que bajo esta operación, la ley es simétrica.* Por ejemplo, existe un axioma físico que dice que *todas las leyes de la física son simétricas cuando cambiamos un sistema de coordenadas por otro.* Los efectos generados por una causa física no cambian, aunque cambia el sistema de coordenadas. Cuando solamente cambiamos la ubicación del sistema físico en uno de los tres

¹¹¹² Alan Guth, *The Inflationary Universe* (1998): 245

¹¹¹³ Andrei Linde, *Inflation and Quantum Cosmology*, (1990): 26

¹¹¹⁴ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 754. Algunos inflacionistas pretenden explicar lo especial de nuestro Universo también por la termalización, que hubo antes de la inflación. Pero, según Penrose, “*es erróneo intentar explicar por qué el Universo es especial en el aspecto que sea con el argumento de la termalización. Porque, si la termalización hace algo (como por ejemplo igualar la temperatura en diferentes regiones), estamos hablando de un aumento de la entropía. Por lo tanto, el Universo habría sido más especial antes que después de la termalización. Esto solamente sirve para aumentar el problema que ya teníamos desde antes cuando queríamos explicar la naturaleza inicial extraordinariamente especial del Universo.*” (Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 755).

¹¹¹⁵ Lee Smolin, *The Trouble with Physics. The Rise of String Theory, the Fall of Science, and What Comes Next* (2006)

¹¹¹⁶ Peter Woit, *Not Even Wrong. The Failure of String Theory and the Continuing Challenge to Unify the Laws of Physics* (2006)

ejes del sistema de coordenadas, se llama *traslación*. Cuando cambiamos su ubicación en el espacio tridimensional, se llama *rotación*. La simetría bajo traslaciones o rotaciones en el *espacio*, implica la ley de *la conservación del momentum*, la simetría bajo traslación en el *tiempo*, implica la ley de *la conservación de la energía*. Este tipo de simetría con respecto al sistema de coordenadas significa que *las leyes físicas son independientes del sistema de coordenadas (background-independent)*. Esta simetría es considerada fundamental en la física clásica y moderna.

OTRO TIPO DE SIMETRÍAS. Existe otro tipo de simetría, donde *cambiamos los objetos físicos sujetos a esta ley y no el sistema de coordenadas*. En una operación donde sustituimos unos objetos por otros, sin que esto afecte el resultado de la ley, la ley física es simétrica en esta operación. Por ejemplo, si dejamos caer pelotas de diferente tamaño y peso, o hechas de diferentes materiales (p.e. fierro o madera), desde una misma altura, todas llegan a la superficie de la Tierra en el mismo momento. Decimos que *la ley de la gravedad de Newton es simétrica en el experimento de Galileo*, a saber, en la operación de sustituir pelotas de un tamaño o peso por pelotas de otro tamaño o peso, o de sustituir pelotas de un material, por pelotas de otro material: “*la aceleración de ambos cuerpos, aún teniendo diferentes masas, es la misma.*”¹¹¹⁷ En todos los casos, la causa, a saber, la gravedad, produce el mismo efecto, a saber, la misma aceleración y la misma duración del viaje.

Si hiciéramos el mismo experimento en un vacío perfecto, se añadiría una tercera simetría, además de las dos ya señaladas, a saber, la ley de la gravedad produce la misma aceleración, independientemente de la *forma* del objeto que cae. Cuando los astronautas en la Luna dejaron caer una pluma de ave y una pelota desde la misma altura, ambos objetos llegaron exactamente en el mismo momento a la superficie de la Luna. En este ejemplo aumentamos el número de simetrías de dos a tres, *al cambiar el contexto del experimento* de la Tierra a la Luna, y vice-versa, se rompería la tercera simetría si cambiáramos el experimento de la Luna a la Tierra. Al conocer más simetrías, aumentamos la información sobre las propiedades de la ley física en cuestión, en este caso la ley de la gravedad.

En el ejemplo de las simetrías de la ley de la gravedad y la consecuente aceleración de diferentes tipos de objetos, las simetrías nos dan información parcial, pero no exhaustiva sobre la fuerza gravitacional. Cuando las características de una fuerza física quedan *exhaustivamente descritas y determinadas por sus simetrías*, decimos que se trata de *gauge forces* y que se aplica el *gauge principle*. ‘Gauge’ significa ‘medida estándar’.

ESTABILIDAD Y SIMETRÍA. El ejemplo arriba dado nos dice que *las simetrías y el rompimiento de las simetrías dependen del contexto físico en que opera una ley física*. No es lo mismo dejar caer una pluma y una pelota de tenis en un vacío o en una atmósfera. Generalmente, *las situaciones de simetría son inestables, y la situación después del rompimiento de la simetría es estable*. Esta es la razón por la que muchas simetrías se rompen espontáneamente, lo que se conoce como *spontaneous symmetry breaking*. Por ejemplo, si pongo un lápiz con su punta en la mesa, en posición perfectamente vertical, para luego soltarlo, la ley de la gravedad determina que el lápiz va a caer, pero no nos dice en qué dirección va a caer. La ley de la gravedad es simétrica con respecto a la dirección de la caída. Pero esta simetría

¹¹¹⁷ Sección 7, al final

es inherentemente inestable. Una vez que el lápiz haya caído, se ha roto la simetría, por la posición final del lápiz. El rompimiento de la simetría ha conducido a una situación estable.

DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES. El conjunto de posibles posiciones del lápiz, después de caer, implica una distribución de probabilidades, que puede tener diferentes formas y cuya suma es uno. En este ejemplo, todas las posiciones posibles tienen la misma probabilidad y se trata de una distribución igualitaria (cuya gráfica tiene la forma de una línea recta). En otros casos, pueden existir otras distribuciones de probabilidad, por ejemplo una curva normal, o una curva synoidal. El que una simetría se rompa, es necesario, pero el modo cómo se rompa es contingente, como observa Smolin: “Las leyes de la física describen solamente el espacio de lo que posiblemente pueda suceder, pero el mundo actual, gobernado por estas leyes, implica una selección de una realización concreta de entre muchas posibilidades.”¹¹¹⁸ Por lo tanto, el paso de una situación simétrica e inestable a una situación asimétrica y estable, y la manera cómo se realiza una de las muchas posibles actualizaciones contenidas en la distribución de probabilidades, depende no solamente de la ley física sino del contexto externo actual en donde esta ley opera, como dice Woit acertadamente:

“Al hablar de la importancia de simetría en la física, las transformaciones simétricas consideradas hasta aquí dejan las leyes físicas invariantes. Aquí se entiende por ‘leyes físicas’ las leyes dinámicas que determinan cómo el estado del mundo evoluciona en el tiempo, expresadas en la física clásica por las leyes de Newton y las ecuaciones de Maxwell y en física cuántica por la ecuación de Schrödinger.¹¹¹⁹ Un punto sutil al respecto es que, aunque la forma de las ecuaciones no cambia bajo las transformaciones simétricas, generalmente las soluciones de estas ecuaciones sí cambiarán [en diferentes ‘estados del mundo’, J.A.]. Porque, aunque las leyes que gobiernan la evolución del estado del mundo pueden ser simétricas, el estado actual del mundo generalmente no lo es.”¹¹²⁰

SIMETRÍA EN LAS FUERZAS (FUERZAS UNIFICADAS). Además de la simetría universal de las leyes físicas con respecto al sistema de coordenadas, y las simetrías parciales con respecto a la sustitución de unos elementos por otros, en diferentes estados del mundo, los físicos han intentado extender el concepto de la simetría todavía más, a saber, a la *simetría de las fuerzas físicas fundamentales*, también conocida como la unificación de las fuerzas en situaciones de temperatura y densidad muy altas, tal como existieron en el *Big Bang*, o pueden generarse en experimentos con aceleradores de partículas. Las cuatro fuerzas de la física son diferentes, en rango de acción y magnitud. Pero se conjetura que a ciertos niveles muy altos de energía, algunas de estas fuerzas, y las partículas portadoras de estas fuerzas, llegan a ser intercambiables, es decir, iguales. Entonces, en tal caso, ya no se trata de diferentes fuerzas sino de una sola *fuerza unificada*.

1118 Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 60

1119 Para un resumen de estas ramas de la física, véanse: Newton: secciones 6, 7 y apéndice II; Einstein: secciones 12 y 13, apéndice V y VI; Maxwell: sección 8 y apéndice IV; Schrödinger: sección 10 y apéndices VII y XI

1120 Peter Woit, *Not Even Wrong. The failure of string theory and the continuing challenge to unify the laws of physics* (2006): 79, negrillas mías

LA BÚSQUEDA VANA DE LA UNIFICACIÓN DE LA FUERZA GRAVITACIONAL Y ELECTROMAGNÉTICA. La búsqueda de la unificación de fuerzas fundamentales, inició antes de que fueron descubiertas, en los años 30, las fuerzas nucleares fuerte y débil. Se trata, por lo tanto, de la búsqueda de la unificación de las fuerzas electromagnética y gravitacional. Ya vimos que Hilbert estuvo a punto de encontrar la solución definitiva de la teoría general.¹¹²¹ Hilbert habría llegado antes que Einstein a la meta final, si no fuera por su pretensión ambiciosa de desarrollar, de una vez, una teoría general unificada de las fuerzas gravitacional y electromagnética. En su publicación de noviembre de 1915, titulado *Los fundamentos de la física*, presentó su versión de la fuerza unificada y la ecuación del campo gravitacional solamente aparece de paso. Hilbert no dio en el blanco, por su falta de conocimientos de física en general, y del tensor de momento-energía en particular, y “*su esquema grandioso resultó ser una delusión.*”¹¹²²

En 1918, Hermann Weyl, un físico alemán, hizo otro intento de unificar la fuerza gravitacional y la electromagnética. Partió de la idea de que no solamente la fuerza gravitacional sino también la electromagnética, son manifestaciones de la geometría del espacio. Weyl presentó su teoría a Einstein quien la encontró matemáticamente seductora, pero físicamente deficiente: “*Aunque no está de acuerdo con la realidad, su idea es en todo caso un logro intelectual destacado.*”¹¹²³ En 1921, Weyl y Teodoro Kaluza, un físico polaco, encontraron otra manera de unificar ambas fuerzas. Siguiendo una idea de 1914 de Gunnar Nordström, un físico finlandés, *augmentó el número de dimensiones espaciales de tres a cuatro*. Al añadir una nueva dimensión espacial a las cuatro dimensiones existentes, se añaden nuevos componentes a los 10 ya existentes del tensor de Einstein. Estos nuevos componentes de la quinta dimensión generan las ecuaciones de Maxwell.

En los años 20, Oskar Klein, un físico sueco, desarrolló más en detalle esta idea de Kaluza. Por esta razón, la teoría se conoce como la de Kaluza-Klein. Kaluza y Klein conjeturaron que cada punto del espacio contiene una quinta dimensión en la forma de un mini-círculo. Si este círculo viaja en el tiempo, se genera una mini-cuerda. Esta idea conduciría después a la teoría de las cuerdas que veremos más adelante. Una partícula que se mueve en esta dimensión invisible, no puede hacer más que dar vueltas dentro de este círculo. La geometría de esta quinta dimensión expresa el campo electromagnético. La carga eléctrica está relacionada con el radio de este círculo. Para obtener el valor empírico de la carga eléctrica, la circunferencia de este círculo debe medir $10^{-32} m$, es decir, debe ser inobservable. La teoría de Kaluza-Klein entusiasmó a Einstein, quien a principios de los años 20, exclamó en una carta a su amigo Hendrik Lorentz, físico holandés: “*Parece que la unificación de la gravitación y la teoría de Maxwell se logra de manera completamente satisfactoria por medio de esta teoría de cinco dimensiones (Kaluza-Klein-Fock).*”¹¹²⁴

La teoría de Kaluza-Klein fue un fracaso rotundo, por cuatro razones, cada una en sí misma suficiente para rechazarla. La importancia de estos cuatro puntos no reside solamente en el hecho

¹¹²¹ Véase la Sección 12.3

¹¹²² Hans Ohanian, *Einstein's Mistakes* (2008): 221

¹¹²³ Citado en Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 45

¹¹²⁴ Citado en: Abraham Pais, *Subtle is the Lord* (2008): 333. Einstein dedicó, en vano, los últimos 25 años de su vida, de 1926 a 1955, a la búsqueda de esta unificación, aunque sea por otros caminos. Hans Ohanian, *Einstein's Mistakes* (2008): 300-310. Según Ohanian, “*los errores más grandiosos de la carrera de Einstein fueron sus varias teorías unificadas de electricidad y gravedad.*” *ib.* pág. 300

que refutan el primitivo intento de unificación de gravedad y electromagnetismo, sino además que anticipa, *mutatis mutando*, la crítica a todo el desarrollo de la física teórica basada en dimensiones adicionales, que se dio en el siglo xx y que acabaría por perderse en el pantano de las supercuerdas y el multiverso como veremos más adelante.

1. Para lograr la unificación se postula la existencia de una dimensión espacial adicional. El problema es, así comenta Ohanian, que el espacio tiene tres y no cuatro dimensiones: “*El espacio físico que observamos tiene tres dimensiones espaciales y una sola dimensión del tiempo, y no cuatro dimensiones espaciales y una dimensión del tiempo, como postulan Kaluza y Klein.*”¹¹²⁵ Esta crítica aparentemente tan obvia ha sido ignorada por físicos teóricos brillantes del siglo xx, pagando un alto precio, no obstante el hecho que esta crítica, no por ser obvia deja de ser acertada.

2. Para remediar esta discrepancia entre la teoría y la realidad, se conjetura que esta dimensión espacial adicional es tan pequeña que no puede ser observada. Al ser invisible, no hay manera de refutar la especulación sobre esta dimensión oculta como casa-cuna de la unificación y por este proceder verificacionista, la teoría se acerca a la frontera entre ciencia y ciencia ficción.

3. La quinta dimensión no solamente es inobservable, sino, además, rígida, para evitar que en el espacio-tiempo de cinco dimensiones, la carga eléctrica sea variable y no constante como debe de ser: “[e]l radio del círculo debe congelarse, para que no varíe ni en el espacio ni en el tiempo (...), lo que atenta contra la esencia de la teoría de Einstein de la relatividad general, donde la geometría es dinámica.”¹¹²⁶

4. Se trata de “un ejercicio matemático estéril,”¹¹²⁷ desligado de la realidad física. “*La unificación de Kaluza-Klein era meramente un truco matemático, al poner las ecuaciones de Maxwell y Einstein en una sola matriz matemática de cinco dimensiones, pero no integraba estas ecuaciones de manera real y físicamente significativa.*”¹¹²⁸ Este divorcio entre matemáticas y física es lo que caracterizará todas las posteriores especulaciones sobre cuerdas y supercuerdas, como veremos más adelante.

LA BÚSQUEDA DE LA UNIFICACIÓN DE LA FUERZA ELECTROMAGNÉTICA Y NUCLEAR DÉBIL. El fracaso inicial de la unificación de las fuerzas gravitacional y electromagnética, no impidió el siguiente éxito de la unificación de las fuerzas electromagnética y nuclear débil. Maxwell unificó la fuerza eléctrica y la fuerza magnética. La teoría electrodébil unifica la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil.¹¹²⁹ A ciertos niveles muy altos de energía la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil son una sola fuerza unificada. Arriba de este nivel de energía, la súper fuerza electrodébil es simétrica. Abajo de este nivel, la simetría se ha roto espontáneamente y las fuerzas con sus respectivas partículas portadoras de estas fuerzas, se diferencian, tanto en magnitud y rango como en su masa.¹¹³⁰ Las dos fuerzas referidas son *gauge forces*. Cuando la fuerza electrodébil se diferencia en dos fuerzas, también la partícula portadora de esta fuerza se diferencia, generando los así llamados *gauge bosons*, a saber, los fotones y para la fuerza electromagnética, y los bosones Z, W^+ y W^- para la fuerza nuclear débil.

¹¹²⁵ Hans Ohanian, *Einstein's Mistakes* (2008): 303

¹¹²⁶ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 47-48

¹¹²⁷ Hans Ohanian, *Einstein's Mistakes* (2008): 304

¹¹²⁸ Hans Ohanian, *Einstein's Mistakes* (2008): 304

¹¹²⁹ Steven Weinberg, “The Electroweak Theory”, en: *The Quantum Theory of Fields, Volume II, Modern Applications* (1996): 305-318

¹¹³⁰ Véase el Apéndice IX, con unidades y constantes de la física

Originalmente, el hecho de que Goldstone demostró¹¹³¹ que “el rompimiento de la simetría electrodébil implica la existencia de bosones Goldstone sin masa y con spin cero, se veía como un obstáculo serio para la búsqueda de las simetrías rotas en la naturaleza”¹¹³² Pero, después, algunos físicos superaron este obstáculo, al descubrir¹¹³³ que “los bosones Goldstone son ausentes donde la simetría es rota localmente, más que globalmente” y las “partículas asociadas con las simetrías rotas localmente adquieren masa.”¹¹³⁴

Una vez superado este obstáculo, “para completar la simetría, hemos de hacer algún supuesto sobre el mecanismo de rompimiento de simetría. Queremos que este mecanismo otorgue masa no solamente a las partículas W^\pm y Z^0 y, sino también al electrón. Ahora bien, la única manera en que esto sea posible en una teoría renormalizable¹¹³⁵ y débilmente acoplada es por medio de la existencia de un campo escalar”¹¹³⁶ Este mecanismo se conoce hoy como “el mecanismo Higgs”¹¹³⁷, y las partículas que corresponden al campo de Higgs se llaman *bosones escalares* o *bosones Higgs*.¹¹³⁸ Las partículas Higgs son los cuantos del campo Higgs.

Haciendo las correcciones radiativas pertinentes, particularmente, al valor de la *fine structure constant* ($\alpha = 1/129$ en lugar de $\alpha = 1/137$), Weinberg obtuvo los siguientes valores de las masas de W^\pm y Z^0 :¹¹³⁹

$$m_w = \frac{38.3\text{GeV}}{|\text{sen}\theta|} \quad \text{y} \quad m_z = \frac{76.9\text{GeV}}{|\text{sen}2\theta|}$$

Comenta Weinberg: “sea cual sea el valor de θ , estas masas son demasiado grandes para que pudiera haber existido esperanza alguna de detectar estas partículas W o Z en los 1960s o 1970s tempranos.”¹¹⁴⁰ Weinberg se refiere al hecho de que los aceleradores de aquel entonces, no eran lo suficientemente poderosos para lograr las altas energías necesarias para producir bosones con estas masas.

Acercándose el año de 1983, todas las mediciones del ángulo θ habían arrojado un valor de $\text{sen}^2\theta = 0.23$, lo que permitió predecir las masas de las dos partículas, a saber, $m_w = 80.1\text{GeV}$ y $m_z = 91.4\text{GeV}$.¹¹⁴¹ En 1983, fueron descubiertas las partículas W^\pm y Z , y con justificado orgullo, Weinberg informa que sus respectivas masas tienen valores “en concordancia satisfactoria con las predicciones de la teoría electrodébil,”¹¹⁴² a saber, $m_w = 80.410 \pm 0.18\text{GeV}$ y $m_z = 91.1887 \pm 0.0022\text{GeV}$. Consta, entonces, que la teoría de Sheldon Glashow (físico estado-unidense nacido en 1932), Abdus Salam (1926-1996), físico pakistaní y Steven Weinberg (físico estado-unidense nacido en 1933), sobre el

¹¹³¹ Jeffrey Goldstone, “Field theories with superconductor solutions”, en: *Nuovo Cimento*, vol. 19 (1961): 154-64 y Jeffrey Goldstone, Abdus Salam & Steven Weinberg, “Broken symmetries”, en: *Physics Reviews*, vol. 127 (1962): 965-970.

¹¹³² Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume II, Modern Applications* (1996): 295

¹¹³³ Peter Higgs, en: *Physics Letters*, vol. 12 (1964): 132 ss.

¹¹³⁴ Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume II, Modern Applications* (1996): 295

¹¹³⁵ ‘Renormizable’ es una ecuación cuando se la puede modificar mediante una técnica matemática que permita que los términos divergentes hasta el infinito se transformen en términos con valores finitos

¹¹³⁶ Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume II, Modern Applications* (1996): 308

¹¹³⁷ Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume II, Modern Applications* (1996): 295

¹¹³⁸ Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume II, Modern Applications* (1996): 316

¹¹³⁹ Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume II, Modern Applications* (1996): 310-311

¹¹⁴⁰ Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume II, Modern Applications* (1996): 311

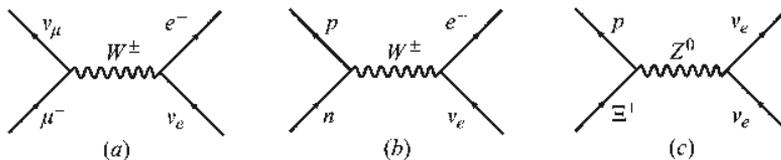
¹¹⁴¹ Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume II, Modern Applications* (1996): 316

¹¹⁴² Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume II, Modern Applications* (1996): 316

decaimiento débil —por el cual recibieron el Premio Nóbel de 1979—ha sido corroborada convincentemente.

Los siguientes diagramas de Feynman de este decaimiento sintetizan lo que se ha podido observar en aceleradores de partículas.¹¹⁴³

GRÁFICA. LA INTERACCIÓN DÉBIL POR MEDIACIÓN DE LOS BOSONES W^+ , W^- Y Z^0



(a) $\mu^- + \nu_e \rightarrow \nu_\mu + e^-$; (b) $n + \nu_e \rightarrow p + e^-$; (c) $\Xi^+ + \nu_e \rightarrow p + \nu_e$

Estas observaciones y correcciones radiativas permitieron estimar la masa del bosón Higgs en $120m_{\text{protón}} \approx 112.5\text{GeV} < m_{\text{Higgs}} < 240m_{\text{protón}} \approx 225\text{GeV}$.¹¹⁴⁴ La masa del bosón Higgs, es la única masa del modelo estándar que no tiene límites bien definidos —no está ‘protegido’ como dicen los físicos cuánticos—, como es el caso de otros bosones y fermiones. Para evitar, en la teoría, que esta masa del bosón Higgs se dispare y para lograr que se mantenga dentro de los límites señalados, *los valores de las constantes libres del modelo estándar —unos 20— han de ajustarse con una precisión de $1/10^{32}$* . Cualquier variación mínima en estas constantes, haría que el bosón Higgs fuera mucho más masivo de lo que predice la teoría electrodébil.

La partícula Higgs es muy importante, no solamente en la teoría electrodébil, sino en el modelo estándar en general, en el cual Gerard ‘t Hooft, físico holandés y —con Maarten Veltman, otro físico holandés— Premio Nóbel de 1999, lo integra.¹¹⁴⁵ La razón por qué es tan importante, según ‘t Hooft, son, en primer lugar, que “*la necesidad de una partícula con spin 0 da a la fuerza débil las simetrías que tiene*”; en segundo lugar, que “*esta partícula Higgs se acopla a los quarks y los leptones para darles la masa que tienen*”, y en tercer lugar, “*la misma partícula Higgs puede también producir transiciones entre varios tipos de quarks*.”¹¹⁴⁶ Según Weinberg, la Higgs es tan importante, que “*la única manera en que esto [el rompimiento de la simetría electrodébil, JA] sea posible, en una teoría renormalizable¹¹⁴⁷ y débilmente acoplada, es por medio de la existencia de un campo escalar ...*”¹¹⁴⁸. Este campo escalar es el de Higgs.

¹¹⁴³ Una lista de partículas elementales y de los símbolos usados para identificarlos se encuentra en el Apéndice VII

¹¹⁴⁴ El límite máximo es de Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume II, Modern Applications* (1996): 316 y el mínimo de Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 260. La masa $m_{\text{protón}} = 938.3\text{MeV}/c^2$

¹¹⁴⁵ Gerard ‘t Hooft, *In search of the ultimate building blocks* (1997): 115

¹¹⁴⁶ Gerard ‘t Hooft, *In search of the ultimate building blocks* (1997): 109

¹¹⁴⁷ ‘Renormalizable’ es una ecuación cuando se la puede modificar mediante una técnica matemática que permita que los términos divergentes hasta el infinito se transformen en términos con valores finitos

¹¹⁴⁸ Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume II, Modern Applications* (1996): 308, mis negrillas

Sin embargo, existe un problema serio con las partículas Higgs, a saber, según 't Hooft, que son “completamente invisibles, mientras se encuentran en el estado más bajo de energía.”¹¹⁴⁹ El *Particle Data Group* las registra como ‘buscadas’ sin ser halladas.¹¹⁵⁰ Según Veltman, el director de tesis de Gerard 't Hooft, era inaceptable que se postulara la existencia de partículas masivas, que están en todas partes, pero, que ¡no tienen efectos gravitacionales! “Veltman era muy escéptico con respecto a estas ideas; [a saber,] que lo que llamamos el espacio vacío, en realidad, está lleno de partículas invisibles. ¿No deberían éstas revelar su presencia a través de sus campos gravitacionales?”¹¹⁵¹

Respondiendo a la crítica de Veltman, 't Hooft afirma que la proposición sobre el bosón Higgs solamente puede salvarse si introducimos una misteriosa repulsión anti-gravitacional que compensa y (y aún sobre compensa, según la teoría de la constante cosmológica¹¹⁵²) el efecto gravitacional de las partículas Higgs y que *nadie sabe cómo funciona esto*. Ambas especulaciones —del bosón Higgs y de la energía oscura— se necesitan mutuamente:

“La teoría puede ser formulada de tal manera que estos campos gravitacionales son exactamente compensados por otras partículas misteriosas o por una contribución misteriosa del espacio vacío mismo. Cómo la Naturaleza se las arregla para encubrir estos efectos gravitacionales tan eficientemente, que nosotros no logremos observar algo, en absoluto, es un misterio que sigue siendo discutido apasionadamente hasta el día de hoy. En mi opinión, la solución de este misterio debe esperarse hasta que entendamos mucho mejor la teoría de la gravedad cuántica. Y esto todavía no se ha logrado.”¹¹⁵³

Aquí claramente vemos que la no observación de un fenómeno (el campo y el bosón Higgs) es explicada por otro fenómeno que tampoco ha sido observado (la constante cosmológica).¹¹⁵⁴ Generalmente, las teorías que establecen relaciones mutuas entre dos fenómenos no observables, cuya existencia no consta, son ciencia ficción, porque no son refutables por los hechos de la realidad.¹¹⁵⁵ Pero, en este caso particular no se trata de ciencia ficción, sino de especulación admisible, porque el hecho de que el misterioso bosón Higgs no ha sido observado en el espacio ordinario, ni en aceleradores de energías relativamente bajas no significa, que no será observable en el futuro. A niveles muy altos de energía, que se esperan lograr en el acelerador de partículas *LHC* del *CERN* en Ginebra —que empezó a funcionar en el verano de 2008, luego se descompuso y se espera vuelva a funcionar en el 2010—, se podrá generar el rompimiento espontáneo de simetrías y producir el bosón Higgs, si es que exista, y, por lo tanto, *se podrá corroborar o refutar la teoría sobre el rompimiento de la simetría electrodébil y sobre la existencia misma del bosón Higgs*. Los científicos del *CERN* dicen que, a partir del momento que entre en operación el acelerador, tomará unos tres a cinco años, antes de tomar

¹¹⁴⁹ Gerard 't Hooft, *In search of the ultimate building blocks* (1997): 113

¹¹⁵⁰ Particle Data Group, 2006, “Review of Particle Physics,” en: *Journal of Physics G. Nuclear and Particle Physics*, Vol. 33 (julio de 2006):32

¹¹⁵¹ Citado en Gerard 't Hooft, *In search of the ultimate building blocks* (1997): 75, mis negrillas

¹¹⁵² Sobre la constante cosmológica, véase la sección 13.3 y 16.3 de este libro

¹¹⁵³ Gerard 't Hooft, *In search of the ultimate building blocks* (1997): 75

¹¹⁵⁴ Véase mi discusión de la constante cosmológica en las secciones 15 y 16 de este libro

¹¹⁵⁵ Véase la Sección 21.3 de este libro, para el análisis de la demarcación entre ciencia y ciencia ficción

una decisión en firme si se haya observado, o no, el famoso bosón.¹¹⁵⁶ El hecho de que el Higgs es observable, aunque sea solamente en situaciones extremas, es la razón por la que la hipótesis sobre el Higgs no es ciencia ficción sino una especulación científica aceptable.

El análisis de los apuntes de Weinberg, Smolin y 't Hooft, hasta aquí, nos permiten hacer algunos comentarios del punto de vista de la lógica de la investigación científica.¹¹⁵⁷

1. *La teoría electrodébil es científica*, porque sus enunciados pueden ser corroborados o refutados.

2. De 1962 a 1983, *algunos enunciados de la teoría electrodébil ya han sido corroborados*, a saber, las características de las partículas portadoras de la fuerza débil W^\pm y Z^0 .¹¹⁵⁸

3. *El enunciado sobre el bosón Higgs es científico, porque puede ser contrastado con la realidad a partir del funcionamiento del Large Hadron Collider del CERN en Ginebra, capaz de energías suficientemente altas para producir el hipotético campo y bosón Higgs.*

¿Se encontrará el bosón Higgs? Gerard 't Hooft es optimista: “*Esta partícula elusiva seguramente se encontrará.*”¹¹⁵⁹ Igualmente optimista, Peter Higgs dice que ya tiene listo el champaña para celebrar el descubrimiento. Otros, como Lee Smolin y Peter Woit, son más cautelosos. Según Smolin, “*antes que nada, queremos que el LHC descubra la partícula Higgs, el bosón masivo que porta el campo escalar Higgs. Si no lo hace, estaremos en graves problemas*”¹¹⁶⁰ y según Woit, “*el supuesto de que el mecanismo para el rompimiento espontáneo de simetría electro-débil sea un campo Higgs elemental (...) bien podría ser equivocado.*”¹¹⁶¹

EL INCIPIENTE VERIFICACIONISMO EN LA BÚSQUEDA DE SIMETRÍAS. De hecho algunos físicos cuánticos se adelantaron a una posible refutación del enunciado sobre el campo escalar Higgs, curándose en salud. Algunos lo desaparecieron como partícula fundamental, conjeturando que el Higgs es *un compuesto de partículas elementales* (sea quarks o leptones ya conocidos; sea un nuevo quark, llamado techniquark; sea partículas fundamentales, llamadas *preones*). Pero, en los años 1980s, quedó claro que estos modelos eran demasiado especulativos y dejaban de llamar la atención. Otros, en un intento teórico de evitar que la masa del bosón Higgs se dispare, planteaban la posibilidad de que el bosón Higgs tenía una súper pareja, el Higgsino, en el contexto de una teoría de la supersimetría que analizaremos más adelante. Pero, esta opción implicaba que cada una de las demás partículas del modelo estándar también tuviera su superpareja. Por ejemplo, los quarks tendrían sus squarks, el fotón su fotino, el neutrino su sneutrino, etcétera. “*De dos en dos, una verdadera arca de Noe de partículas.*”¹¹⁶² Dado que nadie nunca observó uno de estas superparejas, se abandonó también este camino, para tomar otro, a saber, *el rompimiento espontáneo de la supersimetría.*

Se buscaba una teoría en donde las fuerzas físicas eran supersimétricas —unificadas a altas temperaturas y densidades—, pero ajustadas de manera que su estado más bajo de energía —que es

¹¹⁵⁶ Según Francois Rohrbach, físico participante en el proyecto, en una entrevista publicada por *Reforma* 8-04-08

¹¹⁵⁷ Véase Karl Popper, *La lógica de la investigación científica* (1980), y su síntesis en la Sección 21

¹¹⁵⁸ Véase el apéndice VII con una síntesis del modelo estándar.

¹¹⁵⁹ Gerard 't Hooft, *In search of the ultimate building blocks* (1997): 114

¹¹⁶⁰ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 69

¹¹⁶¹ Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 170

¹¹⁶² Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 75

el estado donde la simetría está rota— no sea supersimétrico. En consecuencia, ya no sería necesario que la pareja supersimétrica de cualquier partícula tenga la misma masa que la partícula. Para lograr el rompimiento de esta supersimetría, se necesitaba la existencia de *otras muchas partículas, análogas al bosón Higgs*, cada una también con su superpareja, y luego, dado que estas nuevas partículas no han sido observadas, “*deben de ajustarse las constantes de la nueva teoría de tal manera que todas estas nuevas partículas resulten demasiado pesadas para que puedan ser observadas.*”¹¹⁶³ Pero, las predicciones de la teoría deberían de coincidir con los valores de las partículas conocidas del modelo estándar que constaban por los experimentos.¹¹⁶⁴

El resultado de esta búsqueda fue una teoría llamada el *modelo estándar mínimamente supersimétrica*,¹¹⁶⁵ con más de 100, en lugar de 20 constantes libres. Esta teoría era irrefutable por las observaciones, porque en la parte de la teoría que hacía predicciones observables, se manipulaban las constantes para que la teoría coincidiera con los resultados experimentales del modelo estándar y en la parte de la teoría que generaba predicciones sobre partículas no observadas se manipulaban e incrementaban sus masas para que fueran inobservables en los aceleradores y, *obviamente las predicciones sobre fenómenos inobservables son irrefutables.*

En conclusión, en los desarrollos posteriores de la teoría electrodébil de Glashow-Salam-Weinberg, vemos los inicios de un proceso de ajuste, que por cierto no es responsabilidad, que luego se hizo rampante en todas las teorías que buscan simetría y unificación, como veremos a continuación. Este proceso es lo que se llama *verificacionismo, es decir, una serie de ajustes a la teoría que la vuelven irrefutable.*¹¹⁶⁶

LA BÚSQUEDA DE LA UNIFICACIÓN DE TRES FUERZAS FUNDAMENTALES. A partir de los años 1970s, se empezó a aplicar el *gauge principle* a la fuerza nuclear fuerte, intentando unificarla con la fuerza electrodébil. La parte de la teoría que conjetura la existencia de los quarks, se llama *quantum chromodynamics (QCD)*, en donde la palabra ‘chromo’ (=color) significa que se conjetura que cada uno de los tres tipos de quarks, en cada uno de sus dos ediciones (*up & down, charm & strange, top & bottom*), pueden tener cada uno de tres ‘colores’ (refiriéndose a un nuevo número cuántico, no un color), lo que da un total de 6 quarks, cada uno en tres colores, sin contar las respectivas anti-partículas.

Se especula sobre una partícula portadora de la fuerza gravitacional, el ‘gravitón’. Mi hipótesis es que la fuerza gravitacional es *análoga* a las otras tres, solamente *por sus efectos*, pero que *se trata de un fenómeno enteramente diferente, a saber, la compactación del espacio*,¹¹⁶⁷ y no de una partícula.

La siguiente tabla contiene los fermiones, que son las 12 partículas elementales de las que toda la materia del Universo está constituida¹¹⁶⁸

¹¹⁶³ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 75

¹¹⁶⁴ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 75

¹¹⁶⁵ MSSM = *minimally supersymmetric standard model*

¹¹⁶⁶ Para la explicación de este concepto, véase la Sección 21 de este libro

¹¹⁶⁷ Como argumenté al final de la Sección 12.3.

¹¹⁶⁸ Todos los bariones (unos 120) consisten de tres quarks y todos los mesones (140) de un quark y un anti-quark. Para más detalles, véase el Apéndice VII con el modelo estándar y el Apéndice X con *La Tabla Periódica de los Elementos*

TABLA. MODELO ESTÁNDAR: FERMIONES

SEIS LEPTONES							SEIS QUARKS ¹¹⁶⁹					
Tipo	electrón	electrón neutrino	muon	muón neutrino	tau	tau neutrino	up	down	charm	strange	top	bottom
Símbolo	e	ν_e	μ	ν_μ	τ	ν_τ	u	d	c	s	t	b
Masa GeV/c	$5.1 * 10^{-4}$	$< 1 * 10^{-8}$	0.106	$< 1.7 * 10^{-4}$	1.78	$< 1.8 * 10^{-2}$	0.005	0.01	1.5	0.2	175	4.7
Carga eléctrica	-1	0	-1	0	-1	0	+ 2/3	- 1/3	+ 2/3	- 1/3	+2/3	- 1/3
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$

La siguiente tabla contiene los bosones, portadores de las cuatro fuerzas fundamentales.

TABLA. MODELO ESTÁNDAR: BOSONES

	Portador	Símbolo	Masa GeV/c^2	Carga	Spin	Fuerza entre 2 quarks, distancia		Fuerza entre 2 protones
						$10^{-18} m$	$10^{-17} m$	
Electromagnético	Fotón	γ	0	0	1	1	1	1
Nuclear débil	Portadores fuerza débil	W^-	80.4	-1	1	0.8	10^{-4}	10^{-7}
		W^+	80.4	+1	1	0.8	10^{-4}	10^{-7}
		Z	91.2	0	1	0.8	10^{-4}	10^{-7}
Nuclear fuerte residual	Gluón		0	0	1	25 NA	60 NA	NA 20
Gravitacional	NA	NA	NA	NA	NA	10^{-41}	10^{-41}	10^{-36}

La teoría de la unificación de las tres fuerzas buscaba unificar *cinco* partículas relacionadas con estas tres fuerzas, a saber, los tres tipos de quarks, cada uno en dos ediciones, y dos tipos de leptones, a saber, electrones y neutrinos. Por eso, también se la conoce como la teoría $SU(5)$. La teoría hacía una serie de predicciones propias del modelo estándar, que ya habían sido corroboradas, es decir, incluía en su totalidad el modelo estándar, pero, además *hacía nuevas predicciones también contrastables con la realidad*. Se trataba, por lo tanto, de *una teoría científica*, porque sus hipótesis podían ser corroboradas o refutadas por experimentos físicos. La nueva predicción tiene que ver con el hipotético decaimiento de los protones. Resumo esta parte de la teoría en las palabras de un experto en la materia:

“Una de las nuevas predicciones era que deberían de existir procesos por los cuales los quarks se transforman en electrones y neutrinos, porque en $SU(5)$, quarks, electrones, y neutrinos son meramente manifestaciones del mismo tipo de partícula subyacente. Recordemos que, cuando dos cosas son unificadas, deben de exis-

¹¹⁶⁹ Los quarks no se encuentran aislados, sino se supone que existan dentro de los hadrones y mesones

*tir nuevos procesos físicos por medio de los cuales una se convierte en otra. SU(5), efectivamente predice tal proceso, que es análogo al decaimiento radioactivo. Esta es una predicción maravillosa, propia de una gran unificación. Es requerida por la teoría y es exclusiva de ella. El decaimiento de quarks en electrones y neutrinos tendría una consecuencia visible. Un protón que contiene el quark, dejaría de ser un protón y se desintegraría en cosas más simples. Por lo tanto, protones dejarían de ser partículas estables –sufrirían un tipo de decaimiento radiactivo. Claro está, si esto sucediera muy a menudo, nuestro mundo se desintegraría, dado que todo lo [material] que es estable está hecho de protones. Si los protones decaen, la tasa de decaimiento sería muy pequeña. Y esto es exactamente lo que la teoría predice: una tasa de menos de un decaimiento cada 10^{33} años.*¹¹⁷⁰

Dada la rareza del evento de decaimiento de protones, se diseñó un experimento, llenando tanques subterráneos, en minas abandonadas, a gran profundidad, con agua ultra pura, donde deberían de observarse, dada la tasa de decaimiento tan baja, unos cuantos decaimientos anuales. El resultado de este experimento fue la refutación de la teoría:

*“Los resultados del experimento fueron esperados ansiosamente. Después de 25 años, todavía estamos esperando. Ningún protón ha decaído. Hemos estado esperando por suficiente tiempo para saber que la gran unificación SU(5) es una teoría falsa. Se trata de una idea muy bella, pero que no ha sido adoptada por la naturaleza (...). Aún después de 25 años, todavía quedo desconcertado que SU(5) es una teoría que no funciona.”*¹¹⁷¹

El director del Centro de Física Teórica del MIT, Edward Farhi, comenta lo mismo: *“Yo habría apostado mi vida que los protones decaerían. SU(5) era una idea tan bella, todo cabía en ella perfectamente... y luego resulta que la idea no es cierta.”*¹¹⁷²

Ante este resultado negativo, se tomó, una vez más, el camino del *verificacionismo*, es decir, una serie de ajustes a la teoría que la vuelven irrefutable.¹¹⁷³ En el caso de SU(5), se añadieron algunas simetrías y partículas, complicando la teoría, lo que implicaba que existen más constantes físicas cuyos valores son libres y pueden fijarse sin que consten por experimentos. Esto permitía ajustar los valores de las constantes de tal manera que el decaimiento de los protones se volvía lo suficientemente raro para que no pueda ser observado jamás en el tiempo que le queda a la Tierra antes de ser englobada por el Sol. La teoría SU(5) se hizo irrefutable. El problema es que teorías que se vuelven irrefutables por un proceso de verificacionismo pertenecen a la ciencia ficción.¹¹⁷⁴

SUPERSIMETRÍA. La teoría SU(5) dejaba dos entidades distintas sin unificarlas, a saber, los *bosones*, que son portadores de fuerzas, como los fotones y las partículas W^{\pm} y Z^0 , los gluones y los hipotéticos gravitones, por un lado, y los *fermiones*, que son constitutivos de la materia, como electrones,

¹¹⁷⁰ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 63-64

¹¹⁷¹ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 64, 65

¹¹⁷² Citado en Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 64

¹¹⁷³ Para la explicación de este concepto, véase la Sección 21 de este libro

¹¹⁷⁴ Véase la Sección 21 de este libro

protones, neutrones y neutrinos, por otro lado. Las teorías supersimétricas pretenden unificar fuerzas y materia, bosones y fermiones. La supersimetría es un proceso en que podemos sustituir bosones por súper fermiones, y fermiones por súper bosones, sin cambiar los resultados del experimento. Se conjetura que cada fermión tiene una súper pareja, a saber, un bosón desconocido con la misma masa y carga. Por ejemplo, la pareja del electrón sería el súper electrón o ‘selectrón’. Esta simetría es algo difícil de lograr, porque los fermiones, entre ellos los electrones, obedecen al principio de exclusión de Pauli, que los impide estar en el mismo estado cuántico, y los bosones, al contrario, buscan estar en el mismo estado cuántico. Primero, cuatro rusos de la Unión Soviética propusieron esta teoría, a saber, Evgeny Likhtman y Yuri Golfand, en 1971, y Vladimir Akulov y Dmitri Volkov, en 1972. Nadie leía las revistas soviéticas, de modo que en Occidente nadie se enteró, pero la misma teoría fue redescubierta en Occidente por Julius Wess y Bruno Zumino en 1973.

El problema es que en los aceleradores de partículas nadie jamás ha observado este selectrón. Y no solamente esto, las energías necesarias para lograr esta supersimetría, jamás pueden ser alcanzadas en los aceleradores de partículas. Si para el Higgs se necesita unos 100 GeV, para obtener un rompimiento espontáneo de supersimetría se necesitan por lo menos 10^{15} GeV.¹¹⁷⁵ Aquí ya empieza, una vez más, el proceso de *verificacionismo*, arriba explicado, con el fin de hacer irrefutable la teoría. Al aplicar la idea del rompimiento espontáneo de simetría a la supersimetría, el selectrón adquiere una masa mucho mayor que la del electrón. Es más, al manipular, en la teoría, los valores estimados de las constantes libres, de las cuales hay muchas, *se puede hacer el selectrón tan masivo como se necesite para que ningún acelerador lo pueda detectar jamás*. Y así se ‘explica’ por qué no ha sido observado ni será observado jamás en ningún acelerador de partículas. No existen, por lo tanto, predicciones claras que no sean ambiguas. La teoría está en un estado fluido de cambio continuo, siempre con el fin de evitar la refutación por los hechos. Criticando este modo de proceder, Smolin señala este proceso de verificacionismo con nítida claridad:

*“Observe el lector que esta historia suena como otras que hemos oído. Alguien conjetura una nueva unificación. Hay consecuencias grandes para los experimentos. Desafortunadamente, los experimentos no están de acuerdo con la teoría. Entonces, los científicos complican la teoría, de tal manera que incorpore varias constantes ajustables. Finalmente, las constantes se ajustan para esconder el fenómeno predicho que no se observó, explicando así por qué la unificación, de ser cierta, no ha producido algunas predicciones observables. Pero esta maniobra hace la teoría difícil de refutar, porque siempre puedes explicar y desaparecer algún resultado negativo ajustando las constantes. La historia de supersimetría ha sido, desde el principio, un juego que procura esconder las consecuencias de la unificación. (...) En los últimos 30 años, la primera tarea de cada nuevo acelerador de partículas [más potente] ha sido la de buscar las partículas que la supersimetría predice. Ninguna ha sido hallada. Acto seguido, las constantes [libres] se ajustan hacia arriba, y esperamos el siguiente experimento.....”*¹¹⁷⁶

Aunque Smolin no usa el término ‘ciencia ficción’, lo que sí afirma es que este modo de proceder no es científico:

¹¹⁷⁵ Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 169

¹¹⁷⁶ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 69

“Las teorías de supersimetría conjeturan la existencia de todo un nuevo conjunto de partículas y hacen cada partícula simétrica con otra partícula, sea conocida, sea otra partícula desconocida. Este tipo de éxito teórico es demasiado fácil, a saber, inventar todo un nuevo mundo de lo desconocido y luego crear una teoría con muchos parámetros —parámetros que pueden ser ajustados para que se pueda esconder [hacer inobservable, JA] estas cosas nuevas— no es muy impresionante, aunque es un desafío técnico [matemático, JA] lograr esta hazaña. Se trata de un modo de teorizar que no puede fallar, dado que cualquier desacuerdo con datos del presente puede ser eliminado manipulando algunas constantes.”¹¹⁷⁷

En conclusión, el incipiente verificacionismo en las teorías de unificación de la fuerza electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte, se hizo más descarado y rampante en las teorías de supersimetría, preparando el pantano de las supercuerdas que analizaremos a continuación.

LAS SUPERCUERDAS. En 1968 Gabriele Veneziano, sin usar la palabra ‘strings’ o ‘cuerdas’, introdujo el concepto matemáticamente, dando ecuaciones que describen las probabilidades que dos partículas chocan y se dispersan (*scatter*) con diferentes ángulos.¹¹⁷⁸ A principios de los 1970s, Yoichiro Nambu, Holger Nielsen y Leonard Susskind, cada uno en forma independiente, interpretaron estas ecuaciones con la vieja teoría de la matriz-S.¹¹⁷⁹ En una representación visual de su propuesta, las partículas ya no son puntos en el espacio, sino *cuerdas* que solamente existen en una sola dimensión y pueden estirarse y contraerse así como ligas de hule. Cuando se estiran aumentan su energía, y cuando pierden energía se contraen. Estas cuerdas viajan por el espacio-tiempo y pueden chocar e intercambiar energía. Al igual que ligas de hule, las cuerdas también pueden vibrar. Los diferentes estados de vibración corresponden a las diferentes partículas producidas en los experimentos de choques de protones en aceleradores de partículas. La imagen de cuerdas representaba, además, muy bien lo que pasa entre quarks unidas por gluones, que son los portadores de la fuerza nuclear fuerte. Cuando dos quarks se alejan uno del otro, la fuerza nuclear fuerte primero aumenta, y luego queda constante, independientemente de la distancia, pero cuando dos quarks se acercan mucho, la fuerza nuclear fuerte entre ellos se debilita. La imagen de la liga de hule visualizaba de alguna manera este resultado.

Las matemáticas de la teoría de las cuerdas son complicadas. Antes, para ubicar una partícula en el espacio, se necesitaban tres números. Ahora, se necesitaban tres números para cada punto de la cuerda, la cual contiene un número infinito de puntos. Es el mérito de los teóricos de las cuerdas

¹¹⁷⁷ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 78

¹¹⁷⁸ Gabriele Veneziano, “Construction of a Crossing Symmetric Regge-Behaved Amplitude for Linearly Rising Regge Trajectories”, en: *Nuovo Cimento* (1968): 59, 190-197

¹¹⁷⁹ Independientemente por Yoichiro Nambu de la Universidad de Chicago; Holger Nielsen, del Instituto Niels Bohr; y Leonard Susskind, actualmente de la Universidad de Stanford. *Physical Review Letters* rechazó el artículo de Susskind. Los tres físicos interpretaron las fórmulas de Veneziano como una matriz-S para una teoría de mecánica cuántica que corresponde a un sistema de mecánica clásica en donde las partículas son reemplazadas por cuerdas. La matriz-S, con “S” de “*scattering*”, concebida por John Wheeler en 1937 y desarrollada por Heisenberg en 1943, es un objeto matemático que nos dice qué pasa cuando dos partículas que vienen de diferentes rumbos chocan: ¿se dispersan (*scatter*), siguiendo su camino intactos, pero con diferente momentum?; ¿ó se anihilan, produciendo otras partículas? La teoría de la matriz-S responde estas preguntas. Pauli criticaba la teoría de la matriz-S de Heisenberg, porque no resolvía el problema de las divergencias, cuando a distancias muy cortas, las energías del choque entre dos partículas se acercan teóricamente al infinito. El éxito de la teoría renormalizada de *QED* (véanse las Secciones 10 y 11 de este libro) para eliminar las infinidades desplazó parcialmente la teoría de la matriz-S, pero ésta seguía siendo popular como teoría de la interacción fuerte hasta que fue desplazada por la teoría de *QCD* y por la corroboración definitiva del modelo estándar de la teoría cuántica en noviembre de 1974. Véase Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 146-152.

el haber resuelto este problema matemático. Sin embargo, del punto de vista de la física, la teoría es fantasiosa e irreal. Por esta razón, la teoría de las cuerdas, concebida originalmente como una teoría de la interacción fuerte, fue desplazada por el modelo estándar, porque resultaba poca atractiva para la comunidad de los físicos teóricos. Es que la teoría de las cuerdas solamente era consistente con la relatividad especial de Einstein y la mecánica cuántica *si se satisfacían cuatro condiciones, cada una inaceptable para un físico ortodoxo:*¹¹⁸⁰

- a. El mundo debe de tener 25 dimensiones espaciales.
- b. Debe existir una partícula, el tachyon, que viaja a una velocidad mayor que la de la luz.
- c. Además del fotón, deben de existir otras partículas sin masa, es decir partículas que nunca están en reposo, porque la masa es la medida de la energía de una partícula en reposo.
- d. No existen fermiones, es decir, no hay lugar para quarks

Estas cuatro condiciones eran muy problemáticas. La tercera condición (c) era un problema, porque no se conocían partículas, sujetas a la interacción fuerte, sin masa. La cuarta condición presentaba “*un problema enorme para ¡una supuesta teoría de las interacciones fuertes!*”¹¹⁸¹ Pero, sobre todo, las primeras dos condiciones (a y b) habrían sido suficientes para rechazar la teoría, si se hubiera tomado en serio el hecho que *se violan dos axiomas de la física*; a saber que la velocidad de la luz es la máxima posible en el Universo y que el espacio tiene tres dimensiones y no 25. Comentando las 25 dimensiones espaciales, dice Smolin: “*No parece que el mundo tiene 25 dimensiones espaciales. Por qué la teoría [de las cuerdas] no fue abandonada allí mismo, en este mismo instante es uno de los grandes misterios de la ciencia.*”¹¹⁸²

Según Gerard ‘t Hooft, la teoría de las cuerdas produce partículas fantasma, que solamente se eliminan si se introducen otras partículas fantasma que viajan más rápidamente que la luz (los tachyones), y este modo de proceder es *ciencia ficción*:

*“La única manera de eliminarlas, parecía ser la de escoger los parámetros de las cuerdas en una manera muy especial. Pero, así aparecían diferentes tipos de solución [partículas, JA] que viajaban más rápidamente que la luz. Y esto era tan malo como [las partículas fantasma, JA]. Tal vez, los autores de ciencia ficción piensen que saben cómo manejar partículas que viajan más rápidamente que la luz (...) pero para científicos serios estas partículas son desastrosas. Sin embargo, autores menos escrupulosos efectivamente se dieron permiso para involucrarse en cálculos sobre partículas de esta naturaleza, llamándolas tachyones (en griego ταχυον significa rápido).”*¹¹⁸³

En 1971, Pierre Ramond¹¹⁸⁴ intentó rescatar la teoría, al resolver algunos de estos cuatro problemas. Ramond reintegró los fermiones en el modelo, dado que, en este modelo, “*los operadores que apa-*

¹¹⁸⁰ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 105; y Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 154

¹¹⁸¹ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 105

¹¹⁸² Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 105

¹¹⁸³ Gerard ‘t Hooft, *In search of the ultimate building blocks* (1997): 160, mis negrillas

¹¹⁸⁴ Pierre Ramond, “Dual theory for free fermions”, en: *Physical Review D*, vol. 3(1971): 2415-2418

recen en las ecuaciones que describen las partículas como puntos, en las teorías convencionales, deben concebirse como promedios, durante un ciclo de movimiento interno” del sistema.¹¹⁸⁵ Tanto los bosones como los fermiones aparecen como estados específicos de un mismo sistema muy complejo, y son intercambiables a muy altas energías. A partir de este momento, la teoría de las cuerdas revivió como la teoría de las *supersymmetry strings* o *superstrings* (=supercuerdas). Además, Ramond eliminó los tachyones, haciendo la teoría compatible con la relatividad especial, y redujo el número de dimensiones espaciales de 25 a nueve. Comenta Smolin, irónicamente: “Nueve no es lo mismo que tres, pero está más cerca.”¹¹⁸⁶ Y comenta Woit, sin ironía, pero más tajante: “Esto todavía no eran las cuatro dimensiones correctas, pero por lo menos estaba un poco más cerca.”¹¹⁸⁷

Otra manera de lograr lo mismo fue presentada por Andrei Neveu y John Schwarz, añadiendo a la teoría, además, la posibilidad de que las supercuerdas interactúen. Luego, Neveu y Joel Scherk postularon que las cuerdas tienen estados de vibración que corresponden a bosones y, en 1974, Scherk y Schwarz hicieron los ajustes matemáticos necesarios para que algunas de estos bosones sin masa sean gravitones, presumiendo, con este avance, que la teoría de las supercuerdas era la tan buscada teoría de unificación de la gravedad con las otras tres fuerzas.¹¹⁸⁸

Podemos visualizar las cosas de la siguiente manera. Las cuerdas unidimensionales pueden ser abiertas, como una línea curvada con dos extremidades, o cerradas como una liga. Los fotones se producen por las vibraciones de cuerdas abiertas ó cerradas, y los gravitones únicamente por las vibraciones de cuerdas cerradas. Las extremidades de las cuerdas abiertas son partículas con cargas opuestas, por ejemplo, un electrón y un positrón. La vibración de la cuerda entre las extremidades describe el fotón que transporta la carga entre la partícula y su anti-partícula. Por lo tanto, la cuerda nos da tanto las partículas como las fuerzas y “si la teoría se diseña con suficiente inteligencia, puede producir todas las fuerzas y todas las partículas del modelo estándar”¹¹⁸⁹, y además, como ya vimos, la gravedad y el gravitón. Las cuerdas cerradas se originan en los choques entre las extremidades de una cuerda abierta, produciendo un fotón en la consecuente aniquilación de la partícula y anti-partícula. Las líneas de campos de fuerza de las teorías físicas clásicas, no son otra cosa que las cuerdas en vibración. Esto es el principio de la dualidad de cuerdas y campos de fuerza.

Generalmente, las teorías físicas distinguen entre los movimientos de las partículas y las fuerzas físicas, pero en la teoría de las cuerdas se unifican movimiento y fuerza. Todas las fuerzas se originan en el rompimiento y la reunificación de las cuerdas, que a su vez ocurren por el movimiento de las cuerdas en el espacio-tiempo. Todas las constantes se reducen a solamente dos, a saber, la tensión de la cuerda, que nos dice cuánta energía es contenida por unidad de longitud de cuerda, y la constante de acoplamiento de la cuerda que nos dice la probabilidad de que una cuerda se rompa. La segunda constante realmente no es parte de las ecuaciones de la teoría, sino de su solución, es decir, no se fija por la teoría sino por las condiciones iniciales generadas por el entorno. El movimiento de las cuerdas en el espacio-tiempo obedece a una simple ley. Cuando la cuerda unidimensional se

¹¹⁸⁵ Pierre Ramond, “Dual theory for free fermions”, en: *Physical Review D*, vol. 3(1971): 2415

¹¹⁸⁶ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 105

¹¹⁸⁷ Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 154, mis negrillas

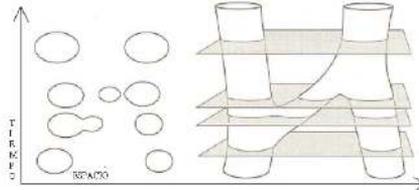
¹¹⁸⁸ Joel Scherk & John Schwarz, “Dual Models for Non-Hadrons”, en: *Nuclear Physics B*, vol. 51 (1974): 118-144

¹¹⁸⁹ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 107

mueve en el espacio, produce una superficie bidimensional en el espacio-tiempo, que se define, más o menos, como el producto de la longitud de la cuerda y su duración en el tiempo.

La ley que rige el movimiento de la cuerda dice que esta superficie siempre es la mínima posible. Este fenómeno es análogo al hecho de que la superficie de la burbuja de jabón es la mínima posible, debido a las fuerzas y restricciones que actúan sobre ella, adquiriendo de esta manera la forma de una esfera tridimensional.

GRÁFICA. EL MOVIMIENTO Y LA INTERACCIÓN DE LAS CUERDAS EN EL ESPACIO-TIEMPO ¹¹⁹⁰



Explicación: del lado izquierdo vemos dos cuerdas en cuatro etapas de su interacción. De lado derecho vemos la superficie que resulta del producto de la longitud de la cuerda y la duración de su movimiento en el tiempo

La especulación sobre las nueve dimensiones espaciales no parecía inquietar demasiado a algunos físicos, pero sí el hecho de la existencia de ‘anomalías’¹¹⁹¹ en la teoría, la cual seguía sin obtener reconocimiento de la comunidad académica.¹¹⁹² Esto cambió radicalmente en 1984, cuando Schwarz y Michael Green publicaron un artículo que demostraba que se podía eliminar estas ‘anomalías’ presentes en la teoría hasta este momento.¹¹⁹³ Aún antes de publicar su artículo, Edward Witten se había enterado de la existencia del manuscrito y pidió que se lo enviaran. El prestigio de Witten era tal, que decenas de físicos teóricos también empezaron a estudiarlo. De la noche a la mañana, la teoría de las cuerdas pasó de una posición marginal a una central en la atención de los físicos teóricos de los EUA. En 1983, se publicaron 16 artículos sobre cuerdas; en 1984, fueron 51; en 1985, fueron 316 y en 1986, fueron 639.¹¹⁹⁴ Comenta Smolin, que “[n]o era de sorprenderse que la gente era tan optimista. La promesa de la teoría de las cuerdas excedía con mucho a cualquier otra teoría unificada propuesta hasta este momento.”¹¹⁹⁵ Es más, “[r]ápidamente se generó una atmósfera casi como de una secta religiosa. Ó eras un teórico de las cuerdas, ó no lo eras.”¹¹⁹⁶ Según Woit, “varios físicos le expresaron que la teoría de las supercuerdas se estaba volviendo una secta, con Witten funcionando como su guru.”¹¹⁹⁷

¹¹⁹⁰ Adaptada de: Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 109

¹¹⁹¹ ‘Anomalías’ aparecen a veces en la física cuántica cuando se aplican técnicas de renormalización para eliminar infinitos en la solución de las ecuaciones. En muchas teorías, la introducción de estas técnicas (necesarias) de renormalización es causa de que el espacio Hilbert deja de ser una representación perfecta del grupo de simetrías. Sobre el problema de las anomalías, véase Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 129-132

¹¹⁹² En 1972, a John Schwarz se le negó una cátedra en física en Princeton University y, en 1976, a Pierre Ramond se le negó una en Yale University

¹¹⁹³ Michael Green & John Schwarz, “Anomaly Cancellations in Supersymmetric D=10 Gauge Theory and Superstring Theory”, en: *Physics Letters B*, vol. 149 (1984): 117-122

¹¹⁹⁴ Dato de Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 158

¹¹⁹⁵ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 117

¹¹⁹⁶ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 116

¹¹⁹⁷ Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 215

En Harvard, el seminario sobre las cuerdas se llamaba “Física Postmoderna”. Una característica importante de la física postmoderna era que raras veces se discutía el problema de cómo poner a prueba la teoría experimentalmente. Según Smolin, muchos partidarios de la teoría sentían que “*solamente podía existir una teoría que unificaba toda la física, y dado que la teoría de las cuerdas parecía hacer precisamente esto, tenía que ser cierta. Quedó atrás la costumbre de apoyarse en experimentos para verificar si la teoría es falsa o verdadera. Esto era cosa de Galileo. Ahora las matemáticas eran suficientes para explorar las leyes de la naturaleza. Habíamos entrado en la era de la física postmoderna.*”¹¹⁹⁸

El hecho de que el espacio observable tiene solamente *tres* dimensiones espaciales y que la teoría postulaba la existencia de *nueve* dimensiones espaciales, *los teóricos de las supercuerdas buscaban la manera de ocultar o compactar las seis dimensiones adicionales*. Se especulaba que eran tan pequeñas que no eran observables, de modo que cualquier enunciado sobre ellas se hacía irrefutable. Se trataba de una teoría sobre la realidad, que impedía que la realidad decidiera si es cierta o falsa. Aquí, una vez más, detectamos el modo de proceder del verificacionismo arriba señalado. Smolin critica este verificacionismo, sin usar el término: “*Si no se quisiera descartar la teoría de una vez por todos, debería de existir una manera de ocultar las dimensiones adicionales. No parecía existir alternativa, sino que enrollar (‘curl up’) estas dimensiones, para que fueran demasiado pequeñas para ser observadas.*”¹¹⁹⁹ Este ocultamiento del espacio seis-dimensional generaba un nuevo problema, a saber, “*el problema de la no-unicidad*”¹²⁰⁰ de la teoría. La teoría de las cuerdas era *background-dependent*, es decir, no era simétrica bajo el cambio de sistemas de coordenadas y, en consecuencia, cada sistema de coordenadas tenía su propia teoría de cuerdas, es decir, cada manera diferente de enrollar (‘curl up’) y ocultar las seis dimensiones adicionales, generaba una nueva teoría:

*“Dado que la teoría de las cuerdas era background-dependent, en un nivel técnico nos daba la descripción de cuerdas moviéndose en geometrías de fondo fijo. Al escoger diferentes geometrías de fondo, obtuvimos técnicamente teorías diferentes (...) Las predicciones físicas que resultaban de estas teorías también eran diferentes (...) Cuando se permite a las cuerdas moverse en la geometría complicada de las seis dimensiones adicionales, surgen grandes cantidades de diferentes tipos de partículas, asociadas con diferentes maneras de moverse y vibrar en cada una de las seis dimensiones.”*¹²⁰¹

Si existe un número ilimitado de concebir la geometría de este espacio oculto seis-dimensional, también hay un número ilimitado de teorías de cuerdas, de las que se podría elegir la que pareciera más adecuada para evitar ser refutada por la realidad. Me explico: la geometría de este espacio seis-dimensional fijaba una lista de constantes libres. Estas constantes determinaban las características particulares de una determinada geometría, por ejemplo, su volumen. Una típica teoría de cuerdas podría tener cientos de constantes, que describían cómo las cuerdas se propagan por el espacio oculto, cómo vibran y cómo interactúan. Cada geometría y manera diferente de moverse, vibrar e interactuar de las cuerdas, implicaba diferentes valores para las constantes y, en consecuencia, pro-

¹¹⁹⁸ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 116-117

¹¹⁹⁹ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 119

¹²⁰⁰ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 119

¹²⁰¹ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 119, 121

ducía diferentes masas de partículas y diferentes magnitudes de las fuerzas. Una minoría de estas partículas y fuerzas formaba parte del modelo estándar, pero, la mayoría era tan inobservable como la geometría que las fijaba: “*dado el hecho que se podría elegir entre un número enorme de geometrías de estas dimensiones adicionales, el número de constantes libres aumentó y no se redujo. No resultaba sorprendente, entonces, que se generaban constantes que eran [más o menos] compatibles con el modelo estándar*”.¹²⁰²

Lamentablemente, “*el modelo estándar no se reprodujo completamente. Si bien es cierto que podemos derivar sus rasgos generales [de las teorías de las cuerdas], como la existencia de fermiones y campos de fuerza, las combinaciones exactas observadas en la naturaleza no resultaban de [la solución de] sus ecuaciones.*”¹²⁰³ Surgió, entonces, una pregunta clave: “*¿Existe una manera de enrollar (curl up) las seis dimensiones adicionales de tal manera que el modelo estándar es reproducido exactamente?*”¹²⁰⁴ Se trataba de encontrar una supersimetría del mundo oculto de las seis dimensiones tal, que al romperse, se manifestaba exactamente en nuestro mundo tridimensional. La respuesta parecía darse en 1985, en un artículo de Candelas, Witten y otros,¹²⁰⁵ quienes aprovechaban un modelo matemático de un espacio de seis dimensiones, desarrollado por Eugenio Calabi y Shing-tung Yau, llamado *espacios Calabi-Yau*. Ahora se podía elegir una geometría del espacio oculto de seis dimensiones espaciales de las cuerdas enrolladas, de tal manera que era compatible con un espacio Calabi-Yau. Así era posible sustituir las constantes del modelo estándar, como por ejemplo las que determinan las masas de las diferentes partículas, por constantes que describían la geometría de un espacio Calabi-Yau.

Pero había un problema. *Había muchos espacios Calabi-Yau*, por lo menos, según Yau mismo, unos cien mil. Cada uno de estos posibles espacios daba pie a otra física de partículas y otra lista de constantes libres. “*No había unicidad, no había nuevas predicciones, y nada era realmente explicado.*”¹²⁰⁶ Es algo análogo a la solución de una ecuación lineal con dos términos desconocidos, por ejemplo $x + y = 6$. Puede ser que $x = 1$ y $y = 5$ o también $x = 33$ y $y = -27$, etcétera. Si había tantas maneras para llegar al modelo estándar de nuestro mundo, realmente no se explicaba nada. No se explicaba por qué este espacio Calabi-Yau y no otro, ni se explicaba cómo se llegaba de un determinado espacio Calabi-Yau a nuestro mundo: “*si nuestro mundo era descrito por uno de los espacios Calabi-Yau, no se explicaba cómo llegó allí.*”¹²⁰⁷ Es importante recordar que *compatibilidad no necesariamente implica causalidad*. A principios de los años 1990s, existían *cinco tipos de teoría de cuerdas*,¹²⁰⁸ con millones de variantes, en los casos en donde algunas dimensiones eran enrolladas.¹²⁰⁹

¹²⁰² Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 121

¹²⁰³ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 121

¹²⁰⁴ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 122

¹²⁰⁵ Philip Candelas, Gary Horowitz, Andrew Strominger & Edward Witten, “Vacuum configurations for Superstrings”, en: *Nuclear Physics B*, vol. 258 (1985): 46-74

¹²⁰⁶ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 122

¹²⁰⁷ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 123

¹²⁰⁸ (1) Teorías de supercuerdas tipo I, a saber, las $SO(32)$, de las cuales Michael Green & John Schwarz, en “Anomaly Cancellations in Supersymmetric D=10 Gauge Theory and Superstring Theory”, en: *Physics Letters B*, vol. 149 (1984): 117-122, habían descubierto en 1984 cómo cancelar las anomalías; (2) dos variantes de teorías de supercuerdas tipo II; (3) teorías de cuerdas heteróticas con dos copias de simetría E_8 ; (4) una variante de las teorías de cuerdas heteróticas, con simetría $SO(32)$. Véanse Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 161 y Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 129

¹²⁰⁹ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 129

En un principio, la teoría de las cuerdas se presentaba como la gran teoría unificada de la física, pero, la multiplicación imparable de las teorías de supercuerdas significaba que “*la misma teoría de las cuerdas estaba necesitada de unificación*”¹²¹⁰ y, en consecuencia, “*a los principios de los años 1990s, el interés en la teoría de supercuerdas empezó a declinar.*”¹²¹¹

Otro problema que contribuía a la disminución de su popularidad, era que no se explicaba qué era lo que ‘congela’ la geometría de un espacio Calabi-Yau. En teoría, una geometría podría cambiar continuamente, lo que implicaba que también las constantes que correspondían a esta geometría podrían variar continuamente:

“*Las constantes que generan la geometría de las dimensiones adicionales pueden variar continuamente [y] esto da pie a inestabilidades (...). A no ser que exista algún mecanismo misterioso que congela la geometría de las dimensiones adicionales, estas inestabilidades conducen a un desastre, como, por ejemplo singularidades que resultan del colapso de las dimensiones adicionales.*”¹²¹²

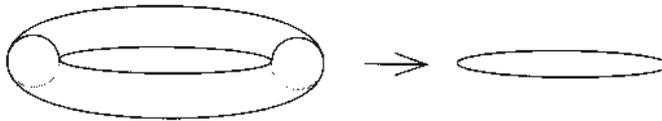
En marzo de 1995, Witten trató de rescatar la teoría de las supercuerdas, en un congreso sobre cuerdas en Los Ángeles, con la sugerencia de que debería de existir una teoría que unificaba estos cinco tipos de teorías de cuerdas. No presentó esta teoría, pero mencionaba algunas características que debería de tener, aprovechando avances recientes que relacionaban la teoría de las cuerdas con la relatividad general, entre otras cosas. El medio para lograr esta unificación era lo que se llama *dualidad*, a saber, dos maneras de describir el mismo fenómeno, algo análogo a las dos versiones de una relación de pareja en crisis dadas por ambas partes. Algunas dualidades eran exactas, dando dos versiones del mismo fenómeno. Otras dualidades eran aproximadas. La dualidad más simple era la dualidad-T, donde T significa topológico, y se refería a la cantidad de veces que una cuerda se enrolla alrededor de una de las dimensiones compactadas e invisibles visualizadas como un tubo. Este número se conoce como el *winding number*. Otra dualidad era la dualidad-S, en donde S significa *strong-weak*. Se especulaba que la constante de acoplamiento, que vimos arriba y que nos dice la probabilidad g de que una cuerda se rompa y se una a otra cuerda, podía unir dos tipos de teorías. En una teoría, esta constante era el recíproco de la otra teoría (g y $1/g$). Si en una teoría g era muy pequeña, indicando interacciones débiles, en la otra era grande, indicando interacciones fuertes.

Para lograr esta unificación de los cinco tipos de teoría de cuerdas, Witten conjeturaba que debería de existir *una décima dimensión espacial*, dando un total de once dimensiones, haciendo la teoría de las cuerdas potencialmente unificable con una teoría supersimétrica de la gravedad que también contaba con once dimensiones. Esta dimensión espacial adicional permitía afirmar que una cuerda en realidad contiene una dimensión oculta, transformándola de una liga en algo así como un *donut*, así como se puede apreciar en el siguiente dibujo:

¹²¹⁰ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 129

¹²¹¹ Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 161

¹²¹² Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 123

GRÁFICA. UNA CUERDA CONCEBIDA COMO UNA MEMBRANA ¹²¹³

Explicación: del lado izquierdo se observa una membrana bidimensional enrollada sobre la décima dimensión espacial oculta, que tiene forma de círculo; lado derecho: de lejos la membrana se ve como una cuerda cerrada

La sugerencia de Witten implicaba una posible integración de las teorías de las cuerdas con una teoría de los años 1980s llamada de las membranas. Witten la bautizó la teoría-M y anunciaba que en el futuro próximo se descubriría cuál era esta teoría. Hasta la fecha “*nadie sabe cuál es esta teoría*”.¹²¹⁴ La promesa de una futura teoría-M dio un nuevo impulso a los teóricos de las supercuerdas. En 1997 empezó en Amsterdam una serie de conferencias anuales de teóricos de cuerdas; en 2002, en Cambridge University, había 445 participantes; en 2003, en Kyoto, 293; en 2004, en París, 477; y en 2005, en Toronto, 440.

Pero, este modo de proceder, de ofrecer *una promesa de teoría que no existe realmente, como si fuera una teoría*, provocaba la crítica de otros físicos de renombre, como, por ejemplo, Gerard 't Hooft:

*“Yo no estoy dispuesto llamar la teoría de las cuerdas una ‘teoría’, tal vez sea (...) una corazonada. A fin de cuentas, una teoría debería de incluir un conjunto de instrucciones de cómo identificar las cosas que desea describir, en nuestro caso las partículas elementales, y uno debería, por lo menos en principio, ser capaz de formular las reglas para calcular las propiedades de estas partículas, y cómo hacer nuevas predicciones con respecto a éstas. Imagínate que te regalan una silla, pero te explican que todavía faltan las patas, y que pronto se entregarán el asiento, la espalda y los brazos; lo que se te ofreció, ¿todavía se puede llamar una silla?”*¹²¹⁵

Dado que todavía no se conoce la teoría-M, no existen predicciones basadas en esta teoría que pueden ser contrastadas con la realidad, experimentalmente. Obviamente, una teoría no existente, es irrefutable. Se trata del caso más puro de verificacionismo. Como dice Feynman, “[l]os teóricos de las cuerdas no hacen predicciones, ofrecen excusas.”¹²¹⁶

El lector tal vez se pregunte, si esta teoría con su espacio oculto, antes con seis y desde 1995 con siete dimensiones espaciales adicionales, es tan fantástica, ¿por qué los físicos no abandonaban a Alicia en su viaje por el país de las maravillas¹²¹⁷ y por qué no regresaban a

¹²¹³ Adaptada de: Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 136

¹²¹⁴ “No one knows what it is”, Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 183

¹²¹⁵ Citado en Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 181-182

¹²¹⁶ Citado en Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 180

¹²¹⁷ George Gamov escribió *En el país de las maravillas* (1958); original inglés: *Mr. Tompson in Wonderland*. Pero, Gamov pensaba en las teorías de la *Relatividad* y *cuantos* como dice el subtítulo de su libro, y yo uso el término *Wonderland* para designar el país de la ciencia ficción, donde la ciencia se ha perdido en un mundo de enunciados no contrastables con la realidad física del mundo 1 (véase la Sección 21).

nuestro mundo de tres dimensiones espaciales? Es una buena pregunta. De hecho algunos lo hicieron, entre ellos Lee Smolin, quien expresaba su simpatía y admiración por esta teoría en un libro de 1997,¹²¹⁸ pero la critica con argumentos demolidores en su libro de 2006,¹²¹⁹ o también Daniel Friedan, uno de los fundadores de un conocido grupo de teóricos de cuerdas, de Rutgers University, quien recientemente expresó que “[l]a teoría de las cuerdas ha fallado como teoría de la física, dada la existencia de un múltiplo de geometrías de fondo del espacio-tiempo (...) La confiabilidad de la teoría de las cuerdas no puede ser evaluada, mucho menos establecida. La teoría de las cuerdas no tiene credibilidad como teoría de física.”¹²²⁰

Además, físicos y matemáticos de renombre han criticado en términos tajantes este juego con dimensiones espaciales ocultas. Dice por ejemplo Richard Feynman:

*“Yo pienso que todo esto de las cuerdas es un disparate y va en la dirección equivocada. (...) No me gusta que [los teóricos de las cuerdas] no verifiquen sus ideas. No me parece que cada vez que algo es refutado por un experimento, ellos cocinan una explicación, para arreglar el problema. (...) Por ejemplo, la teoría requiere diez dimensiones. Tal vez exista una manera de enrollar seis de las diez dimensiones. Esto es matemáticamente posible, pero ¿por qué no siete? Cuando escriben sus ecuaciones, éstas deberían de decidir cuántas dimensiones queden enrolladas, no el deseo de estar de acuerdo con experimentos. No existe una razón, en absoluto, por qué no pueden ser ocho de las diez dimensiones que quedan enrolladas y tampoco por qué el resultado [en nuestro mundo visible, JA] no sea dos dimensiones [en lugar de tres, JA], lo que estaría en total desacuerdo con la experiencia. (...) [La teoría de las cuerdas] no produce nada, debe ser excusada la mayor parte del tiempo, no parece correcta.”*¹²²¹

En términos igualmente tajantes y hasta enojadamente se expresa otro Premio Nóbel, a saber, Sheldon Glashow:

“Los teóricos de las cuerdas no han mostrado hasta ahora que su teoría realmente funciona. No logran demostrar que el modelo estándar es una consecuencia lógica de la teoría de las cuerdas. Ni siquiera pueden estar seguros que su formalismo incluya una descripción de cosas como protones y electrones. Y no han generado ni una sola predicción experimental por chiquita que sea. Peor aún, la teoría de las supercuerdas no se deriva lógicamente de algún conjunto atractivo de hipótesis sobre la naturaleza. ¿Por qué, puede uno preguntarse, insisten los teóricos de las cuerdas que el espacio tiene nueve dimensiones? Sencillamente, porque la teoría no tiene sentido en otro espacio. (...) Hasta que las gentes de las cuerdas no logren interpretar ciertas propiedades del mundo real, simplemente no están haciendo física. Ellos, ¿deberían de recibir su pago de parte de las universidades y el permiso de pervertir la mente de estudiantes impresionables? ¿Será posible que estudiantes jóvenes que están en proceso de doctorarse y cuya experiencia ha sido restringida a la teoría de supercuerdas, encuentren empleo cuando la cuerda se rompa? ¿Son los pensamientos sobre cuerdas más

¹²¹⁸ Lee Smolin, *The Life of the Cosmos* (1997)

¹²¹⁹ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006)

¹²²⁰ Citado en Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 192

¹²²¹ Entrevista a Richard Feynman, realizada en 1987, un año antes de su muerte, citada en Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006):125 y Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 180

apropiados para departamentos de matemática y aún para escuelas de teología que para departamentos de física? ¿Cuántos ángeles pueden bailar en la cabeza de un alfiler? ¿Cuántas dimensiones existen en un múltiplo compacto, que es diez a la potencia 30 veces más pequeño (= $1/10^{30}$, JA) que una cabeza de alfiler?”¹²²²

¿Por qué, si esta teoría se ha criticado con argumentos sólidos, aún no pocos físicos siguen comprometidos con ella? Me parece que se trata de una combinación de dos factores, a saber, en primer lugar, *una fascinación con milagros matemáticos* y en segundo lugar, *políticas de poder académico*. A continuación veremos ambos puntos.

Recordemos el comentario hecho por Smolin, arriba, sobre la física postmoderna de las cuerdas: “*Ahora las matemáticas eran suficientes para explorar las leyes de la naturaleza. Habíamos entrado en la era de la física postmoderna.*”¹²²³ Críticos dentro de la comunidad de los físicos, sostienen que los teóricos de las cuerdas “*hacen matemática, no física.*”¹²²⁴ La mejor definición de la teoría de las cuerdas que yo he encontrado es la de John Horgan, a saber, una teoría que “*no es mucho más que ciencia ficción en forma de matemática.*”¹²²⁵

Es significativo, que, en un artículo sobre la conjetura de la teoría M, cuatro teóricos de las cuerdas hablan de ‘evidencia’ (*evidence*) para su teoría, no en el sentido de pruebas empíricas, sino de milagros matemáticos. Dicen, por ejemplo que “[*n*]uestra evidencia más fuerte para nuestra conjetura es la demostración que nuestro modelo contiene las excitaciones que se supone existan en la teoría M, súper gravitones y grandes membranas clásicas meta estables. (...) La manera cómo estas excitaciones surgen es algo milagroso y consideramos que esta es la evidencia central para nuestra conjetura.”¹²²⁶ Y al final del artículo, hablan de otras posibles ‘pruebas’ (*tests*) de la teoría, “*que pueden conducir a una corroboración de la conjetura*”, pero no se refieren a hechos empíricos sino a implicaciones matemáticas.¹²²⁷

Tradicionalmente, una teoría debe de cumplir con dos condiciones para que sea una teoría científica: 1) consistencia matemática y lógica; y 2) contrastabilidad con la realidad empírica. Los teóricos de las cuerdas, viendo que no hay manera de contrastar su teoría con la realidad, han abandonado la segunda condición, transformando así la ciencia, como señala Horgan, en “*ciencia ficción en forma de matemáticas.*”¹²²⁸ Posteriormente, Susskind, uno de los cuatro autores, volvió a expresar su fascinación con los milagros matemáticos realizados en la teoría de cuerdas: “*Es excitante que todas las consecuencias de la teoría de las cuerdas se desenvuelven en forma matemáticamente consistente.*

¹²²² Citado en Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006):125 y Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 181

¹²²³ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 116-117

¹²²⁴ Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 192

¹²²⁵ John Horgan, *Rational Mysticim* (2003): 175. Citado en Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 260, mis negrillas. Horgan es autor de otro libro titulado *The End of Science*, en donde argumenta que los principales descubrimientos científicos ya se han hecho en los siglos XIX y XX. En este punto no estoy de acuerdo con Horgan, sino más bien con Smolin, en *The Trouble with Physics* (2006): de que existen todavía cinco grandes problemas científicos no resueltos. Esto no quita que su definición de la teoría de las supercuerdas como ciencia ficción en forma de matemáticas es la que mejor expresa lo que yo pienso.

¹²²⁶ T. Banks, W. Fischler, S. Shenker & Leonard Susskind, “M theory as a matrix model: A conjecture”, en: *Physical Review D* (1997): 5112-5154

¹²²⁷ T. Banks, W. Fischler, S. Shenker & Leonard Susskind, “M theory as a matrix model: A conjecture”, en: *Physical Review D* (1997): 5125

¹²²⁸ John Horgan, *Rational Mysticim* (2003): 175, citado en Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 260

*La teoría de las cuerdas es una teoría matemática muy compleja con muchas posibilidades de fracaso. Por ‘fracaso’ entiendo ‘inconsistencia’. Es como una máquina de alta precisión con miles de partes. A no ser que todas se integren perfectamente de manera correcta, toda la máquina se enreda y se para. Pero, el hecho es que sí se integran, a veces a consecuencia de **milagros matemáticos**.”¹²²⁹*

Con respecto a estos milagros matemáticos, Penrose recomienda prudencia. Dice que “*la atracción irresistible de lo que frecuentemente se llaman ‘milagros’ [matemáticos] (...) ha influenciado fuertemente la dirección de la investigación teórica.*”¹²³⁰ Al analizar esta fascinación con los milagros matemáticos, Penrose distingue milagros *físico-matemáticos*, en donde la teoría, matemáticamente consistente, produce enunciados físicos básicos *capaces de ser corroborados o refutados*, los cuales ayudan al progreso de la ciencia, y milagros *meramente matemáticos*, en donde *una teoría no produce enunciados físicamente refutables*. Entre estos últimos milagros, Penrose cuenta los de la teoría de las cuerdas y la teoría-M de Witten:

“Estoy seguro que la teoría de las cuerdas y la teoría M han sido guiadas por un número considerable de tales milagros matemáticos. (...) ¿Son estos aparentes milagros realmente guías de lo correcto en una exploración de la teoría física? (...) [U]no ha de ser extremadamente cauteloso con estas cosas. (...) El descubrimiento de Dirac donde la ecuación de onda relativista incorporaba automáticamente el ‘spin’ del electrón parecía ser uno de estos milagros (...) así como la propuesta de Einstein en su teoría general de la relatividad, que concibe la gravedad como espacio curvado, explicaba correctamente el perihelio de Mercurio, que por más de 70 años había intrigado a los astrónomos. Pero, éstas fueron claramente consecuencias físicas apropiadas de las teorías propuestas y estos milagros aportaban corroboración impresionante de las respectivas teorías. Es menos claro cuál es la fuerza de los milagros meramente matemáticos (...)”¹²³¹

Penrose tiene razón, porque, si bien es cierto que la consistencia lógica-matemática es necesaria para que una teoría pueda ser calificada como científica, *esta consistencia en sí no es suficiente y en sí no corrobora la teoría*. La teoría ptolemaica del Universo era matemáticamente consistente, pero la evidencia empírica de Kepler y Galileo la refutó. La teoría gravitacional newtoniana era matemáticamente consistente, pero el perihelio de Mercurio, explicado por la relatividad general de Einstein, la sustituyó como teoría universal. Si las matemáticas *revelan* la estructura ordenada y oculta de la realidad¹²³², éstas están al servicio de la contrastabilidad de una teoría física y no la impiden, y esta teoría es científica. Pero, si las matemáticas tienen como fin *ocultar* la estructura ordenada y oculta de la realidad, éstas vuelven la teoría inmune a la confrontación con ella, y se trata de ciencia ficción en forma de matemáticas. Ahora bien, las matemáticas en la teoría de las cuerdas pretenden, entre otras cosas, la compactación y el consecuente ocultamiento de las seis o siete dimensiones espaciales ocultas para hacerlas inobservables *con el fin de sustraer la teoría a la confrontación con la realidad*.

¹²²⁹ Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape* (2005): 124

¹²³⁰ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 1038

¹²³¹ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 1040-1041

¹²³² Véase la Sección 21, para el significado de “estructura ordenada y oculta” de la realidad

*“Las teorías supersimétricas de diez y once dimensiones actualmente en uso son muy complicadas para ser descritas con precisión. La compactación de las seis o siete dimensiones ocultas de estas teorías, necesaria para intentar hacerlas algo parecidas al mundo real son a la vez excesivamente complicadas y excesivamente feas.”*¹²³³

Es algo así como proponer una teoría que pretenda explicar el fenómeno de las cabras y ovejas decapitadas como obra de chupacabras, declarando que los chupacabras tienen el don de volverse inobservables a la mirada humana. ¿Será posible refutar esta teoría?

También *políticas machiavélicas de poder académico* ayudaron a mantener la teoría de las cuerdas en el centro del quehacer académico de los EUA. Lee Smolin ha explicado en detalle cómo los teóricos de las cuerdas, aprovechando una época en que la teoría parecía prometedora, han conquistado las facultades de física más prestigiosas de los EUA; y cómo, con políticas de poder académico, han acaparado los financiamientos y han dejado a los estudiantes que quieren doctorarse solamente dos opciones: ó hacer investigación en este campo, ó no recibirse. Susskind confiesa que el dominio de una teoría en el mundo académico es cuestión de poder y no de física: *“Una buena metodología científica no es un conjunto abstracto de reglas inventadas por filósofos, sino es decidida por los científicos que crean ciencia.”*¹²³⁴ Me parece que esta filosofía de la ciencia de Susskind es poco crítica y muy autoritaria. Recordemos, en este contexto, el comentario de Glashow, de que la teoría de las cuerdas se mantiene con vida por el poder y no por la física: *“Hasta que las gentes de las cuerdas no logren interpretar ciertas propiedades del mundo real, simplemente no están haciendo física. Ellos ¿deberían de recibir su pago de parte de las universidades y el permiso de pervertir la mente de estudiantes impresionables? ¿Será posible que estudiantes jóvenes que están en proceso de doctorarse y cuya experiencia ha sido restringida a la teoría de supercuerdas, encuentren empleo cuando la cuerda se rompa?”*¹²³⁵ La desconcertante historia de este autoritarismo y descarada política de poder rebasa el tema de mi libro y refero al lector interesado al revelador relato de Smolin al respecto.¹²³⁶

LA TEORÍA-FICCIÓN DEL MULTIVERSO. El notable fracaso de las teorías de las cuerdas de unificarse como una sola teoría, contrastable con la realidad, ha llevado a algunos de sus partidarios a curarse en salud. *Han abandonado la búsqueda de unificación de la teoría y también la exigencia fundamental de la ciencia de presentar enunciados que pueden ser corroborados o refutados por la realidad física del Universo observable. Especulan sobre muchos Universos, que por definición son inobservables.* Uno de las especulaciones de este nuevo enfoque es que *existen múltiples mundos con un número variable $(1 + p)$ de dimensiones, a saber, una dimensión temporal más p membranas espaciales.*¹²³⁷ Cada Universo tiene su propio número de dimensiones. Al nuestro le tocaron cuatro. *Ninguno de los teóricos del multiverso se ha preocupado por explicar cuál es el supuesto mecanismo que asigna un diferente número de dimensiones a diferentes Universos y que hace variar el valor de las constantes de las leyes físicas en los diferentes Universos.* Comenta Smolin:

¹²³³ Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 265

¹²³⁴ Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape* (2005): 194

¹²³⁵ Citado en Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 181

¹²³⁶ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): Introducción y Capítulo 16

¹²³⁷ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 910-916

“En los últimos años ha habido una vuelta de 180° en el pensamiento de los teóricos de las cuerdas. Las esperanzas de tantos años de encontrar una teoría unificada ha retrocedido y muchos creen ahora que la teoría de las cuerdas debe entenderse como un vasto paisaje de posibles teorías, cada una de las cuales gobierna una región diferente de un Universo múltiple.”¹²³⁸

La representante más destacada de esta teoría-ficción es la del multiverso de Susskind.¹²³⁹ Como Susskind es consciente de que los enunciados sobre otros Universos no son contrastables con la realidad, se ha dedicado a ridiculizar la filosofía de la ciencia de Popper, en la cual esta contrastabilidad con la realidad es la piedra angular. Para Susskind no es necesario hacer experimentos u observaciones para ver si una teoría es cierta y rechaza y ridiculiza a los “Popperazzi”¹²⁴⁰ y el “Popperismo”¹²⁴¹. Sabiendo que no hay manera de contrastar la teoría del multiverso con la realidad, mejor rechaza la exigencia de que las teorías científicas sean contrastables.

No voy a detenerme en un análisis de esta teoría-ficción, porque en mi libro evalué hipótesis científicas, no teorías ficción. Si alguien se interesa en conocer los pormenores de esta ciencia-ficción, puede leer el libro de Susskind¹²⁴² o el de Michio Kaku.¹²⁴³ Con razón, en el libro de Kaku, no solamente abundan referencias a publicaciones sobre las teorías de las cuerdas, sino a muchas obras de ciencia-ficción reconocidas como tales. Habría sido más consistente si su libro *Parallel Worlds* no hubiera recibido el subtítulo *The Science of Alternative Universes*, sino *The Science-Fiction of Alternative Universes*.

Sin embargo, sí quiero analizar brevemente como en la teoría del multiverso, no solamente está presente la confusión de la teoría-M, sino, además, la gran confusión cuántica¹²⁴⁴, transferida sobre la cosmología. Susskind parte del ejemplo del decaimiento del neutrón. La desviación estándar alrededor del tiempo promedio de decaimiento del neutrón permite generar una función probabilística, en este caso una curva normal que tiene, precisamente, la forma de una onda. Dice, acertadamente, Susskind que en una serie de experimentos con neutrones, “[l]a función de onda es un conjunto de probabilidades de todos los posibles resultados de todas las posibles observaciones en el sistema en consideración.”¹²⁴⁵

Pero, a partir de este punto, Susskind, un físico teórico, se desliza hacia la confusión de la escuela de Copenhague y logra inclusive aumentarla. Comenta que dos minutos después de que se haya dado a luz un neutrón, la probabilidad de que éste haya decaído es casi cero, pero unos diez minutos después, la probabilidad de que un neutrón haya decaído es equivalente a la probabilidad de que no haya decaído y unos veinte minutos después la probabilidad de que el neutrón haya decaído es casi uno. Por lo expuesto en la crítica a la gran confusión cuántica,¹²⁴⁶ el lector entenderá que

¹²³⁸ Lee Smolin, *The Trouble with Physics* (2006): 149

¹²³⁹ Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape. String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (2006)

¹²⁴⁰ Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape. String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (2006): 192

¹²⁴¹ Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape. String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (2006): 195

¹²⁴² Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape. String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (2006)

¹²⁴³ Michio Kaku, *Parallel Worlds. The Science of Alternative Universes and our Future in the Cosmos* (2005)

¹²⁴⁴ Para un análisis detallado de la gran confusión cuántica, véase la Sección 23 de este libro

¹²⁴⁵ Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape. String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (2006): 317

¹²⁴⁶ Para un análisis detallado de la gran confusión cuántica, véase la Sección 23 de este libro

tenemos aquí *tres diferentes experimentos, cada uno con su función probabilística universal*, a saber, en primer lugar, un experimento donde la probabilidad de observar el decaimiento del neutrón dos minutos después ($t = 120$) de su nacimiento, es $P(\delta|t = 120)$ *es casi cero*); en segundo lugar, un experimento donde se observa el decaimiento del neutrón diez minutos después, a saber, $P(\delta|t = 720) \cong 1/2$; y en tercer lugar, un tercer experimento donde se observa el decaimiento del neutrón veinte minutos después de su nacimiento: $P(\delta|t = 1200)$ *es casi uno*).

Pero, Susskind no lo ve así. Apropiándose de la confusión de la escuela de Copenhague, ve en estos tres experimentos ‘un colapso’ de la función de onda. Por ejemplo, si observamos el neutrón desintegrado, en el minuto 12, la función probabilística de $P(\delta|t = 720) \cong 1/2$ ‘colapsa’, según él, para dar lugar a $P(\delta|t = 720) = 1$: “*El colapso de la función de onda, en el momento que se hace una observación, es el primer ingrediente de la famosa interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica celebrada por Niels Bohr.*”¹²⁴⁷ Este razonamiento es notable, al provenir de un doctor en física, por la falta de lógica elemental. *Lógicamente, se trata de diferentes experimentos, con diferentes funciones probabilísticas.* El primer experimento, repetido muchas veces, arranca en $t = 0$ y termina en $t = 720$ y busca poner a prueba el siguiente enunciado probabilística universal: $P(\delta|t = 720) \cong 1/2$. El segundo experimento, un tanto trivial, pero realizable, arranca en el punto $t = 720$, seleccionando los casos en donde el neutrón ya se ha desintegrado y parte, entonces, de otro enunciado probabilística, a saber: $P(\delta|\delta = 1) = 1$. La confusión de Susskind es exactamente igual a la de Heisenberg en su comentario sobre el experimento con el espejo semi-reflejante.¹²⁴⁸ En el Apéndice XI analizo la función de onda de Schrödinger y compruebo que es un constructo matemático, que se obtiene a partir de una simple función senoidal o cosenoidal, y que no tiene significado físico. Sin embargo, llevándola al cuadrado obtenemos una distribución de probabilidades que sí tiene significado físico.

Ya estamos metidos en ‘la gran confusión cuántica’, pero Susskind no se queda allí, sino que la lleva a extremos nunca alcanzados. Él critica a Bohr, porque éste, conservadoramente, afirmó que una vez ‘colapsada’ la onda, todas las demás probabilidades o ‘ramificaciones’ desvanecen y dejan de ser posibilidades reales. Susskind, más progresista, ‘rescata’ estas otras probabilidades, no tanto como posibilidades reales de una situación experimental repetible, sino más bien como ya realizadas en alguna parte del escenario de ‘muchos mundos’ de Everett. Después de una observación hecha en determinado experimento, las demás probabilidades que no se observaron en el experimento, *se han hecho realidad en otros mundos, inaccesibles a nuestras observaciones*:

*“Según los partidarios de la interpretación de ‘muchos mundos’, todas las ramificaciones de la función de onda son igualmente reales. En cada cruce el mundo se escinde en dos o más Universos, que viven para siempre, uno al lado del otro... de tal manera que las diferentes ramas nunca interactúan una con la otra después de haberse escindido (...) La regla de Bohr es, sencillamente, un truco para desaparecer todas las demás ramificaciones, las cuales, aunque [según Susskind, JA] sean muy reales, ya no tienen efecto en el observador.”*¹²⁴⁹

¹²⁴⁷ Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape. String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (2006): 319

¹²⁴⁸ Véase la Sección 23

¹²⁴⁹ Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape. String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (2006): 320-322

Sobre la base de esta confusión, Susskind y otros cosmólogos pretenden apuntalar su teoría del multiverso:

*“La idea pionera de Carter al combinar el Principio Antrópico con la interpretación de los ‘muchos-mundos’ era ésta: suponer que la función de onda incluye ramas no solamente para cosas tan ordinarias como la ubicación de un electrón o el decaimiento o no-decaimiento de un neutrón ..., sino también para las diferentes leyes de la física.”*¹²⁵⁰

La idea central de esta teoría es que la función de onda crea muchos Universos que realmente existen, y en cada uno de estos Universos existen diferentes conjuntos de leyes de la física y, por lo tanto, deja de ser sorprendente que también hay un Universo (el nuestro) donde las constantes y leyes físicas por casualidad han tenido los valores precisos que han permitido que ha emergido la vida en la Tierra (el principio antrópico). Consta, entonces, que la ‘gran confusión cuántica’ tiende la mano a la confusión de la teoría de las cuerdas. Una confusión tiende la mano a la otra y ambas generan la teoría-ficción del multiverso.

Físicos más críticos son conscientes de que la teoría de las cuerdas y del multiverso de Susskind no es científica. Dice, por ejemplo, Lawrence Kraus, un cosmólogo, que la base de la teoría del multiverso, a saber, la teoría de las cuerdas, es una “*Teoría de Nada*”.¹²⁵¹ Y el premio Nóbel David Gross señala que la tesis de Susskind “[e]s imposible de refutar” y “*dado que no podemos refutar la idea, no es ciencia.*”¹²⁵² George Ellis, criticando el libro, afirma otro tanto:

*“Un falange de físicos y cosmólogos de peso pretenden comprobar la existencia de otros dominios de Universos en expansión, aunque no hay manera de observarlos, ni existe posibilidad alguna de poner a prueba su supuesta naturaleza, a no ser de la manera más tenue e indirecto. ¿Cómo puede esto ser una propuesta científica, si el núcleo de la ciencia es contrastar teorías con la evidencia empírica?”*¹²⁵³

Sección 20.7. Conclusión sobre las teorías del multiverso

Hemos analizado seis diferentes teorías del multiverso:

1. La teoría de Hoyle de los *campos creacionales* en el Universo observable
2. La teoría del *Big Crunch* de Wheeler
3. La teoría de la *variación de las constantes* de Barrow
4. La teoría del *multiverso en agujeros negros* de Smolin
5. Cómo la teoría de la inflación llevó a la teoría-ficción de la *eterna inflación* de Guth-Linde
6. Cómo la búsqueda de supersimetría llevó a la teoría-ficción del multiverso de Susskind

¹²⁵⁰ Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape. String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (2006): 322

¹²⁵¹ Lawrence Kraus, *Hiding in the Mirror* (2005), citado en: Peter Woit, *Not Even Wrong* (2006): 192

¹²⁵² Citado en Geoff Brumfiel, “Our Universe. Outrageous Fortune”, en: *Nature*, vol. 439 (2006):10-12

¹²⁵³ George Ellis, “Physics ain’t what it used to be”, en: *Nature*, vol. 438 (2005): 739-740

Los primeros cuatro son teorías científicas porque tienen consecuencias observables. Se trata de la teoría de los campos creacionales de Hoyle; la teoría del *Big Crunch* de Wheeler; la teoría de la variación de las constantes de Barrow (y otros); y la teoría del multiverso en agujeros negros de Smolin. Estas cuatro teorías han sido refutadas por los hechos, como vimos en las Secciones 20.1, 20.2, 20.3 y 20.4. Luego, en las Secciones 20.5 y 20.6 hemos analizado dos teorías de las cuales demostramos que no son contrastables con los hechos de la realidad física, razón por la cual deben ser clasificadas como ciencia ficción, según los criterios de la filosofía de la ciencia que explico en la Sección 21.3. Se trata, entonces, de la teoría-ficción de la eterna inflación de Guth-Linde, y la teoría-ficción de las cuerdas y el multiverso de Susskind, Kaku y otros.

Tenemos, entonces, cuatro teorías científicas, refutadas por los hechos, y dos teorías-ficción, pertenecientes al ámbito de la ciencia ficción. Estas seis teorías trataron, de una manera u otra, resolver el problema del *fine-tuning* del Universo en el momento del *Big Bang*. La conclusión de esta revisión es que *las teorías del multiverso no representan una explicación científica del hecho del fine-tuning*.